

---

# Untersuchung der taktilen Wahrnehmung für die Gestaltung konkaver Rückmeldungen

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

## Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Sinja Kristin Röbig**

(geb. Hahn)

aus Werneck

<b>Berichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
<b>Mitberichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
<b>Tag der Einreichung</b>	26. März 2015
<b>Tag der mündlichen Prüfung:</b>	07. Juli 2015

Darmstadt, 2015

D17

---



---

## Vorwort und Danksagung

---

Meine Dissertation wurde im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt verfasst. Daher möchte ich an erster Stelle Prof. Ralph Bruder danken, der mich als Doktorandin am Institut aufgenommen hat. Vielen Dank für die Unterstützung während meiner Zeit am Institut und für die Kommentare und Anregungen zur Verbesserung meiner Arbeit. Vielen Dank für meine Zeit am Institut, in der ich viel lernen durfte.

Mein zweiter Dank geht an Prof. Edgar Dörsam, der sich freundlicher Weise und ohne zögern dazu bereit erklärt hat die Co-Betreuung meiner Arbeit zu übernehmen. Vielen Dank!

Ich möchte mich auch beim ganzen Institut bedanken. Vielen Dank für die tolle Zeit am Institut. Ich habe viel von euch gelernt. Die Zusammenarbeit mit den unterschiedlichen Disziplinen hat mir immer Freude bereitet. Danke für all den Input zu meiner Arbeit und für die fachlichen Diskussionen. Danke für jede Unterstützung in stressigen Zeiten.

Besonders gilt mein Dank an dieser Stelle noch Michaela Kauer. Danke für die Unterstützung und das Vertrauen in meine Arbeit. Danke für allen Input, besonders in der letzten Phase meiner Dissertation. Danke auch für das gesamte Korrekturlesen, trotz deiner knappen Zeit.

Das Dissertationsvorhaben baut u. a. auf Erkenntnissen von studentischen Arbeiten auf, die durch mich betreut wurden. Daher gilt mein besonderer Dank auch den Studenten, deren Arbeiten zu meinem Dissertationsvorhaben beigetragen haben. Herzlichen Dank an Robert Beregowez, Marc Jäger Florian Klug, Daniel Mangold, Tulga Mendjargal, Navid Namdar, Thorsten Röse, Robby Theodore.

Ein weiterer Dank geht an meine Schwiegereltern. Vielen Dank für eure Unterstützung! Einen besonderen Dank für die teilweise kurzfristige Betreuung von Finn, die es mir ermöglicht hat meine Arbeit trotz schwieriger Rahmenbedingungen so schnell zu Ende zu bringen.

Danke auch an meine Eltern, die mich mein ganzes Studium über unterstützt haben und dir mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Auch einen Dank an meinen Bruder Tobias für viele aufmunternde Gespräche. Ein herzlicher Dank an meine Mutter. Danke, dass du mir immer das Gefühl gegeben hast, dass da „noch jemand ist“, wenn ich Hilfe brauche. Danke meinem Vater und meine Stiefmutter, welche mir immer mit Rat-schlägen zur Seite gestanden haben.

Danke an meinen Sohn Finn. Danke, dass du so ein Sonnenschein bist, der mich immer aufheitert und zum Lachen bringt. Danke, dass du es mir so leicht gemacht hast Arbeit und Familie zu verbinden. Ich liebe dich mein kleiner Engel.

Mein letzter aber größter Dank geht an meinen Mann. Ich kann mich nicht genug bedanken für das, was du für mich getan hast. Danke für die Unterstützung in all den Jahren, dass du immer an mich geglaubt hast und mich

---

ermutigst hast nicht aufzugeben. Danke, dass du mich in der letzten Schreibphase so unterstützt hast, mir die Zeit verschafft hast, die ich gebraucht habe. Danke für alle Anregungen zu meiner Arbeit, für die Formatierung und alle Unterstützung, die du mir gegeben hast. Ich liebe dich von ganzem Herzen.

---

## Zusammenfassung

---

In den letzten Jahren haben technische Fortschritte zu einem starken Wandel in der Gesellschaft geführt. Während früher das Arbeiten auf das Büro beschränkt war, so ist das Arbeiten aufgrund neuer Technologien überall möglich. Egal ob im Büro, zu Hause oder gar unterwegs, mit Tablet-PCs und Smartphones können beispielsweise auch unterwegs E-Mails geschrieben oder sonstige Arbeitstätigkeiten erfüllt werden. Dies ist nur möglich, da die neuen Geräte, neben dem erschwinglichen Preis, leicht und klein geworden sind, sodass sie in jede Tasche passen. Weniger Gewicht und die geringere Größe sind unter anderem durch neue Interaktionskonzepte wie Touchscreens möglich, wodurch keine Tastaturen mehr benötigt werden. Nachteil ist hierbei jedoch, dass das taktile Feedback ohne Tasten verloren geht. Dadurch sinkt die Arbeitsgeschwindigkeit.

Um dem Nachteil der fehlenden taktilen Informationen entgegenzuwirken, werden neue Technologien entwickelt. Hierzu zählen unter anderem die sogenannten dielektrischen Elastomer-Stapelaktoren, kurz DEA genannt. Sie ermöglichen es, ein entsprechendes taktilen Feedback zu geben. Allerdings, anders als bei herkömmlichen Tastaturen, werden hierbei Bedienfelder generiert, welche nicht konvex sind, also erhaben, sondern konkav. Die Wahrnehmung solcher konkaven Formen ist derzeit in der Literatur noch wenig erforscht. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Gestaltungshinweise für die Verwendung konkaver Formen erstellt. Diese sind jedoch nicht nur für die Anwendung bei DEA geeignet, sondern auch übertragbar auf alle Anwendung, welche konkave Formen verwenden.

Für die Ermittlung der Gestaltungshinweise wurden vier Studien durchgeführt. Untersucht wurde dabei, ab welcher Größe und Tiefe konkave Formen wahrgenommen, also empfunden werden können, und ab welcher Größe und Tiefe die Formen auch erkannt werden können. Ebenso wurde untersucht, welchen Abstand zwei konkave Formen haben müssen, um als zwei Formen erkannt zu werden. Darüber hinaus erfolgten die Betrachtung unterschiedlicher Materialien (Silikon, Aluminium und PVC) sowie die Betrachtung geführter und ungeführter Bewegungen. Die Gestaltungshinweise wurden jeweils gemittelt für alle Probanden und für männliche und weibliche Probanden getrennt erstellt. Auch wurden in drei der Studien unterschiedliche Altersgruppen betrachtet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine Formwahrnehmung bei 0,1 mm Formtiefe bei Aluminium und PVC, sowie bei 0,3 mm bei Silikon problemlos möglich ist. Die benötigte Formgröße variiert dabei je nach Material und Probandengruppe zwischen 4 mm und 8 mm für eine 100%-ige Wahrnehmung. Eine Formerkennung hingegen ist deutlich schwieriger und erreicht beispielsweise bei nie 100%. Bei der statistischen Auswertung zeigen sich bestätigt, dass sich Wahrnehmung und Erkennung signifikant unterscheiden. Auch das Alter spielt bei der Formwahrnehmung, sowie bei der Formerkennung bis 0,3 mm Formtiefe eine signifikante Rolle. Für das Geschlecht konnten bei der Formwahrnehmung bis 0,3 mm Formtiefe und bei der Formerkennung bei 0,1 mm Formtiefe signifikante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden aufgezeigt werden. Auch das Material hat einen signifikanten Einfluss auf die Formwahrnehmung und Formerkennung, wo-

---

hingegen ein Einfluss der Form nur bei einzelnen Formtiefen festgestellt wurde. Die Regessionsanalyse zeigt, dass bei den verwendeten Formgröße und –tiefen die Formgröße einen stärkeren Einfluss auf die Formwahrnehmung und –erkennung hat als die Formtiefe.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort und Danksagung.....	i
Zusammenfassung.....	iii
Inhaltsverzeichnis .....	v
1. Einleitung.....	1
1.1. Ziele dieser Arbeit.....	3
1.2. Aufbau der Arbeit .....	4
2. Stand der Technik und Forschung .....	5
2.1. Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren.....	6
2.1.1. Aufbau und Funktionsweise .....	6
2.1.2. Gestaltungsmöglichkeiten dielektrischer Elastomer-Stapelaktoren .....	7
2.2. Taktile Wahrnehmung .....	9
2.2.1. Definition .....	9
2.2.2. Taktile Wahrnehmung beim Menschen .....	10
2.3. Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Arbeit .....	14
2.4. Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung.....	15
2.4.1. Technische Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung .....	15
2.4.2. Menschbezogene Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung .....	23
2.5. Forschungsfragen .....	28
3. Versuche zur Untersuchung der Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen.....	30
3.1. Konkretisierung der Forschungsfragen .....	31
3.2. Übersicht der Versuche .....	33
3.3. Studie 1: Wahrnehmungs- und Erkennungsgrenze konkaver Formen in Silikon .....	34
3.3.1. Probanden der Studie 1.....	34
3.3.2. Testkörper der Studie 1 .....	34
3.3.3. Versuchsaufbau der Studie 1.....	35
3.3.4. Versuchsablauf der Studie 1.....	35
3.3.5. Ergebnisse der Studie 1 .....	36
3.3.6. Diskussion der Studie 1.....	66
3.4. Studie 2: Wahrnehmungsgrenze konkaver Formen in Silikon –ungeführte Bewegung.....	68
3.4.1. Probanden der Studie 2.....	68
3.4.2. Testkörper der Studie 2 .....	68
3.4.3. Versuchsaufbau der Studie 2.....	69
3.4.4. Versuchsablauf der Studie 2.....	69
3.4.5. Ergebnisse der Studie 2 .....	70
3.4.6. Diskussion der Studie 2.....	73
3.5. Studie 3: Zweipunktschwelle konkaver Formen im statischen Bereich für Silikon .....	74

3.5.1.	Probanden der Studie 3 .....	74
3.5.2.	Testkörper der Studie 3 .....	74
3.5.3.	Versuchsaufbau der Studie 3 .....	75
3.5.4.	Versuchsablauf der Studie 3 .....	75
3.5.5.	Ergebnisse der Studie 3 .....	75
3.5.6.	Diskussion der Studie 3.....	78
3.6.	Studie 4: Materialeinfluss auf die Wahrnehmungs- und Erkennungsgrenze konkaver Formen.....	80
3.6.1.	Probanden der Studie 4 .....	80
3.6.2.	Testkörper der Studie 4 .....	80
3.6.3.	Versuchsaufbau der Studie 4.....	81
3.6.4.	Versuchsablauf der Studie 4 .....	81
3.6.5.	Ergebnisse der Studie 4 .....	82
3.6.6.	Diskussion der Studie 4.....	107
4.	Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die taktile Wahrnehmung .....	108
4.1.	Vorgehen bei der statistischen Auswertung .....	109
4.2.	Einfluss der Form .....	110
4.3.	Wahrnehmung und Erkennung der Form.....	111
4.4.	Einfluss des Alters.....	112
4.5.	Einfluss des Geschlechts .....	113
4.6.	Einfluss des Materials .....	114
4.7.	Einfluss Formtiefe vs. Formgröße.....	116
4.8.	Diskussion der Ergebnisse .....	118
5.	Gestaltungshinweise für konkave Rückmeldungen.....	120
5.1.	Übersicht ermittelter Gestaltungshinweise .....	121
5.2.	Zusammenfassung der Gestaltungshinweise .....	129
5.3.	Grenzen der Gestaltungshinweise.....	130
6.	Diskussion .....	131
7.	Ausblick.....	134
	Abbildungsverzeichnis .....	137
	Tabellenverzeichnis .....	138
	Abkürzungsverzeichnis .....	143
	Literaturverzeichnis .....	144
	Anhang.....	152
A.1.	Diagramme zu Studie 1.....	152



---

A.1.1.	Wahrgenommene Formen nach Altersgruppen .....	152
A.1.2.	Wahrgenommene Formen nach Geschlecht.....	158
A.1.3.	Erkannte Formen nach Altersgruppen .....	164
A.1.4.	Erkannte Formen nach Geschlecht.....	170
A.2.	Diagramme zu Studie 2.....	176
A.2.1.	Wahrgenommene Formen nach Geschlecht.....	176
A.3.	Diagramme zu Studie 3.....	178
A.3.1.	Richtig erkannte Einzelpunkte und Punktpaare nach Alter.....	178
A.3.2.	Richtig erkannte Einzelpunkte und Punktpaare nach Geschlecht.....	180
A.4.	Diagramme zu Studie 4.....	182
A.4.1.	Wahrgenommene Formen nach Altersgruppen .....	182
A.4.2.	Wahrgenommene Formen nach Geschlecht.....	187
A.4.3.	Erkannte Formen nach Altersgruppen .....	191
A.4.4.	Erkannte Formen nach Geschlecht.....	196



---

## 1. Einleitung

---

Der Mensch ist heute immer und überall von Technik umgeben – egal, ob zu Hause, unterwegs oder im Büro, Technik ist immer präsent. Während Technik früher meist nur in Form eines PCs an der Arbeit oder auch zu Hause am Schreibtisch vorhanden war, so hat die Zahl der Mobilgeräte wie Smartphones und Tablets in den letzten Jahren stark zugenommen. Wurden 2010 noch 0,7 Millionen Tablets verkauft, so waren es 2013 bereits 8 Millionen, bei einer Prognose von 9,2 Millionen für 2014 (Statista, 2014). Diese neuen mobilen Geräte haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Technik immer mit dabei ist, egal wo wir uns gerade befinden. Sie ermöglichen eine ständige Erreichbarkeit sowie das Arbeiten an jedem beliebigen Ort. So können unterwegs in Bus oder Bahn oder zu Hause auf der Couch nicht nur Anrufe getätigt werden, sondern auch Mails abgerufen und geschrieben, Präsentationen vorbereitet oder auch Spiele gespielt werden. Diese Aufgaben wurden früher meist am Desktop-PC oder auch an einem Laptop erledigt. Die Eingaben erfolgten über eine Tastatur. Bei den neuen Geräten wie Tablets und Smartphones wird jedoch häufig auf herkömmliche Tastaturen und Knöpfe verzichtet, um Gewicht zu sparen oder größere Bildschirme zu haben, auch deshalb, weil nicht bei allen Anwendungen Tastaturen nötig sind. Stattdessen geht der Trend hin zu Touchscreens und anderen Sensoroberflächen. Diese haben den Vorteil, dass das jeweils laufende Programm die Kontrolle über die Anordnung der Elemente und Schaltflächen hat (Mößinger, 2010). Diese kann daher für jedes Programm individuell dem Bedarf angepasst werden. Beispielsweise können Tastaturen nur eingeblendet werden, wenn sie benötigt werden, und verschwinden, wenn sie nicht mehr benötigt werden (Mößinger, 2010).

Touchscreens besitzen jedoch auch Nachteile. Sie geben keine taktile Rückmeldung, wie es mechanische Knöpfe tun. Diese lenken sich bei der Bedienung aus und haben einen Anschlag (Mößinger, 2010). Wird dieser erreicht, so ist klar, dass der Knopf betätigt wurde, und dies intuitiv. Tasten können auch bedient werden, ohne hinzusehen, da die Tasten erfühlt werden können. So ist beispielsweise das Schreiben am PC mit dem 10-Finger-System möglich, da die Tastatur erfühlt wird und die Position über die Markierungen auf dem „f“ und dem „j“ ertastet werden kann, ohne den Blick auf die Tastatur zu richten. Ebenfalls konnte noch vor wenigen Jahren ein Telefon mit Tasten ohne Blick auf die Tasten bedient werden. Die Taste in der Mitte, die „5“, war meist über einen erhabenen Punkt markiert, von dort aus konnten die Tasten erfühlt und gewählt werden, oder es konnten auch SMS verschickt werden, ohne auf das Handy zu sehen. Bei Touchscreens ist dies nicht möglich, da keine Tasten im herkömmlichen Sinn vorhanden sind. Ein Teil der Nachteile soll dahin gehend eliminiert werden, dass ein Tastendruck farblich hervorgehoben wird oder mit einem Ton angedeutet wird, so dass zumindest schnell ersichtlich ist, dass die Taste erfolgreich betätigt wurde. Auch integrieren einige Hersteller taktile Rückmeldungen, bei denen das Handy bei Tastendruck vibriert. Allerdings ist trotzdem keine Blindbedienung möglich, da die Tasten nicht erfühlt werden können. Erste Ansätze wie das *Rokr E8* der Firma Motorola versuchen jedoch bereits, einen Tastendruck zu simulieren (Kremp, 2008). Allerdings ist auch dieses Feedback, ebenso wie bei dem Vibrieren des Gerätes, ein Feedback, bei welchem das ganze Gerät bzw. der

---

ganze Bildschirm reagiert (Mößinger, 2010). Auch die Firma immersion stellt bereits unterschiedlichste taktile Displays her. Hierzu zählt die Serie *TouchSense*, welche Touch Displays mit einer Effektbibliothek zur Verfügung stellt (immersion, n.d.). Diese kann frei ergänzt oder abgewandelt werden, um die Verwendung für unterschiedliche Anwendungen zu ermöglichen. Auch hier ist der Touchscreen selber über Piezoelemente gelagert, so dass bei Betätigung zwar ein Tastendruck simuliert wird, sich jedoch eigentlich das ganze Display bewegt (immersion, 2014). Anwendung finden die Touch Displays der Firma immersion beispielsweise im Automobilbereich, bei Bedienelementen in der Industrie, oder auch bei unterschiedlichen Konsumprodukten wie Haushaltsgeräten und Spielkonsolen (immersion, n.d.).

Wie wichtig taktile Rückmeldungen sind zeigt sich auch darin, dass taktile Rückmeldungen heutzutage in den unterschiedlichsten Bereichen verwendet werden. Gerade im medizinischen Bereich sind taktile Rückmeldungen mit dem Einzug der minimalinvasiven Eingriffe immer wichtiger geworden. In diesem Bereich werden ständig neue Entwicklungen getätigt wie beispielsweise die Entwicklung von Sonden, welche dem Chirurg bei der Verwendung taktile Rückmeldungen übermittelt (Hsin-Yun Yao, 2005), damit dieser beispielsweise erkennt in welcher Art von Gewebe er sich befindet. Auch zur räumlichen Orientierung für Sehbehinderte wurden in den letzten Jahren unterschiedliche taktile Hilffsysteme entwickelt, aus welchen sich auch weitere Hilffsysteme für sehende Personen entwickelt haben (Weber et al., 2011). Bei sehenden Personen werden diese Hilffsysteme zum einen verwendet um die Aufmerksamkeit des Nutzers zu erlangen, aber auch, um beispielsweise Bewegungsabläufe zu trainieren oder um einem Nutzer in unbekannter Umgebung zu navigieren (Weber et al., 2011).

Bei Tablet PCs hat sich gezeigt, dass durch die fehlende Möglichkeit der Blindbedienung die Geschwindigkeit bei der Arbeit deutlich abnimmt. Eine Studie von (Sears, 1991) zeigte beispielsweise, dass ein Nutzer mit einer Tastatur im Schnitt 58 Wörter pro Minute tippt, während es am Touchscreen durchschnittlich nur 25 Wörter pro Minute sind. Daher werden neue Technologien benötigt, welche es ermöglichen, ein taktiles Feedback auch an Touchscreens zu erzeugen und Tastaturen oder einzelne Tasten auch hier nur bei Bedarf einzublenden. Eine der Technologien, welche zu diesem Zweck entwickelt wurden, sind dielektrische Elastomer-Stapelaktoren (DEA). Sie können als Eingabe- und Ausgabeelement genutzt werden (Lotz, Flittner, Haus, & Schlaak, 2012; Matysek et al., 2011). Mit DEA können Tasten gestaltet werden, welche bei Bedarf ein und ausgeblendet werden, jedoch sind diese dann nicht konvex, also kommen nicht aus der Oberfläche heraus, sondern sie sind konkav und gehen in die Oberfläche hinein (vgl. Abschnitt 2.1.1). Für Tastaturen und sonstige Bedienelemente gibt es bereits Gestaltungsempfehlungen oder Erfahrungswerte, wie diese zu gestalten sind. Für konkave Formen hingegen gibt es keine Empfehlungen, wie diese zu gestalten sind, um von Nutzern ertastet werden zu können. Daher entstand die Motivation, mit der vorliegenden Arbeit die Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit konkaver Formen zu untersuchen.

---

## 1.1. Ziele dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, im ersten Schritt Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung zu ermitteln, welche für die Gestaltung konkaver Elemente relevant sind. Hierbei ergeben sich Einflussgrößen, welche sich aus der Technologie der DEA ergeben, sowie Einflussgrößen, welche abhängig von der zukünftigen Nutzergruppe sind. Daher gilt es, noch vor Ableitung der Einflussgrößen ein Verständnis der DEA und der taktilen Wahrnehmung des Menschen zu schaffen.

Im Anschluss wurden Versuche durchgeführt, um ausgewählte Parameter und deren Einfluss auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen näher zu untersuchen. Bei dem in den Versuchen verwendeten Material soll es sich, bedingt durch den Anwendungsfall der DEA, vorrangig um Silikon handeln. Die Materialien sollen jedoch durch weitere ergänzt werden, um die Ergebnisse für einen breiteren Anwendungsbereich nutzen zu können. Die Auswertung der Ergebnisse soll im ersten Schritt mittels deskriptiver Statistik erfolgen. Im Anschluss soll eine statistische Auswertung zur Untersuchung einzelner Parameter auf die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen erfolgen.

Im Anschluss an die Versuche sollen auf Basis der gesammelten Daten Gestaltungshinweise für die Verwendung konkaver Formen abgeleitet werden. Diese sollen zukünftig dazu dienen Rückmeldungen zu gestalten, welche konkave Formen verwenden. Dabei sollen die Gestaltungshinweise für einzelne Parameter erstellt werden. Grenzen der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Gestaltungshinweise sollen am Ende der Arbeit nochmals detailliert betrachtet werden.

---

## 1.2. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird eine Übersicht über den Stand der Technik und der Forschung gegeben. In Unterkapitel 2.1 wird dabei auf die Vorstellung der DEA eingegangen, welche die Grundlage für diese Arbeit bilden. In Kapitel 2.2 wird auf die Definition der taktilen Wahrnehmung, die taktile Wahrnehmung des Menschen und die hierfür nötigen taktilen Sensoren eingegangen. Im folgenden Unterkapitel (Kapitel 2.3) werden die Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung aus technischer und aus menschbezogener Sicht vorgestellt. Auf Basis dieser Einflussgrößen werden die Forschungsfragen aufgestellt (Kapitel 2.4). Kapitel 3 beschreibt die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Versuche. Kapitel 3.1 gibt dabei einen Überblick über die in jeder Studie untersuchten Parameter der taktilen Wahrnehmung. Jede der durchgeführten 5 Studien wird anschließend in einem eigenen Unterkapitel beschrieben (Kapitel 3.2–3.6). In Unterkapitel 3.7 wird auf weitere Ergebnisse eingegangen, welche im Rahmen von Studie 4 als Randthema mit untersucht wurden. Kapitel 3.9 schließt Kapitel 3 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Studien ab. Kapitel 4 dient der Vorstellung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Gestaltungshinweise für konkave Formen in Abhängigkeit von den untersuchten Parametern. Darüber hinaus wird in Unterkapitel 3.2 auf die Grenzen der Gestaltungshinweise eingegangen. In Kapitel 5 wird diese Arbeit diskutiert. Kapitel 6 gibt einen Ausblick für die Zukunft.

---

## **2. Stand der Technik und Forschung**

---

Die Ausgangsbasis für diese Arbeit bilden die dielektrischen Elastomer-Stapelaktoren (DEA). Diese wurden am Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) an der Technischen Universität Darmstadt entwickelt. Im Rahmen eines Projektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sollten in Kooperation zwischen EMK, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) und Institut für Arbeitswissenschaft Darmstadt (IAD) die Technik der DEA verbessert, neue Herstellverfahren getestet und Informationen gesammelt werden, wie ein Feedback der DEA für die praktische Anwendung gestaltet sein muss.

Da die DEA den Ausgangspunkt dieser Arbeit bilden wird im Folgenden zunächst der Stand der Technik näher erläutert. Hierbei wird im Detail auf den Aufbau und die Funktionsweise, sowie auf mögliche Anwendungsbereiche der DEA eingegangen. Anschließend werden die Grundlagen der taktilen Wahrnehmung erläutert. Auf Basis der Technik der DEA und der Grundlagen der taktilen Wahrnehmung erfolgt im Anschluss die Ableitung technischer und menschbezogener Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung. Auf Basis ausgewählter Einflussgrößen wurden im Anschluss die Forschungsfragen erstellt, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden.

## 2.1. Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren

Um die für die Untersuchung der taktilen Wahrnehmung relevanten Parameter zu identifizieren, muss im ersten Schritt die Technik der dielektrischen Elastomer-Stapelaktoren, kurz DEA genannt, erläutert werden. Dies ist nötig, um die Parameter zu identifizieren, welche aus technischer Sicht variiert werden können.

### 2.1.1. Aufbau und Funktionsweise

Die DEA bestehen aus zwei unterschiedlichen Materialien:

- einem dielektrischen (nicht leitenden), elastischen Material, im diesem Fall Silikon;
- einer nachgiebigen Elektrode, bei den hier betrachteten DEA aus Graphit.

Eine dielektrische Schicht befindet sich jeweils zwischen zwei Elektroden (siehe Abbildung 2-1). Wird an die Elektroden eine Spannung angelegt, so wird das Dielektrikum senkrecht zur Feldrichtung gedehnt. Da das verwendete Dielektrikum inkompressibel ist, bleibt das Volumen jedoch konstant. Liegt keine Spannung mehr an, so kehrt der Aktor in seine Ausgangslage zurück. Durch das Anlegen einer Wechselfspannung können bei den DEA Vibrationen erzeugt werden. Wichtig ist, dass auch die Elektroden sehr nachgiebig sein müssen, um die Dehnungen zu ermöglichen.

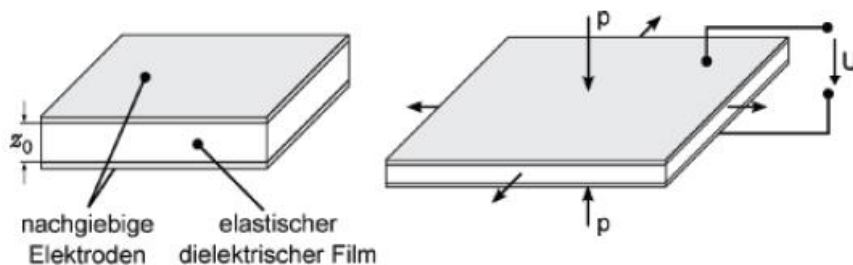


Abbildung 2-1: Aufbau eines DEA, Ansicht im Ruhezustand (links) und im aktuierten Zustand (rechts) (Lotz et al., 2012)

Die dielektrische Schicht sowie die Aktorschicht sind sehr dünn. Prinzipiell können Schichtdicken zwischen 100  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  erzeugt werden (Lotz, Matysek, & Schlaak, 2011). Die verwendeten Schichtdicken sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich. Durch die geringe Schichtdicke ist die erzeugte Höhenänderung des Aktors sehr gering. Um diese Höhenänderung zu verstärken, werden mehrere Schichten übereinandergestapelt (vgl. Abbildung 2-2). Es ist möglich, bis zu 100 Schichten übereinanderzustapeln (Mößinger, 2010). Die derzeit erreichte Auslenkung beträgt hierbei bei statischer Auslenkung bis über 0,3 mm, im dynamischen Bereich ist sie mit ca. 0,02 mm deutlich geringer (Matysek, 2010). Die erreichte Auslenkung ist dabei von Schichtdicke, Schichtanzahl und angelegter Spannung abhängig (Lotz et al., 2012). So kann beispielsweise bei 30 die-



lektrischen Schichten mit Schichtdicken von 0,03 mm bzw. 0,05 mm bei 900 bzw. 1500 V eine Auslenkung von 8 % bis 10 % der Aktorhöhe erreicht werden (Lotz et al., 2012).

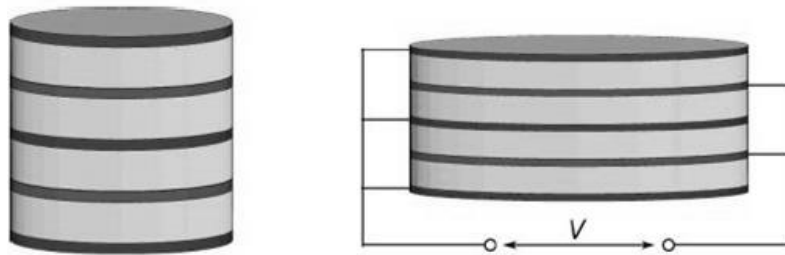


Abbildung 2-2: Aufbau eines mehrschichtigen DEA, links im Ruhezustand, rechts im aktuierten Zustand (Lotz et al., 2011)

### 2.1.2. Gestaltungsmöglichkeiten dielektrischer Elastomer-Stapelaktoren

Prinzipiell erinnert die Funktionsweise der DEA an Piezoaktoren. Diese verformen sich, sobald Spannung angelegt wird. Sie können, ebenso wie DEA, auch als Eingabeelement genutzt werden.

Ein großer Vorteil der DEA liegt jedoch darin, dass sie die flexible Gestaltung eines Bedienelementes ermöglichen. So können beispielsweise einzelne Tasten situationsabhängig ein- und ausgeblendet werden. Tasten, welche beispielsweise bei bestimmten Aktionen keine Funktion haben, können ausgeblendet werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 2-3 zu sehen. Hierbei handelt es sich um ein Bedienelement für die Ansteuerung eines MP3-Players, bei welcher die konkaven Bedienelemente einzeln aktuiert werden können.



Abbildung 2-3: DEA-Steuerung für einen MP3-Player (Lotz et al., 2012)

Um zukünftig noch mehr Freiheit bei der Gestaltung des Bedienfeldes zu haben, ist geplant, sogenannte „Taxel“ herzustellen. Der Begriff ist in Anlehnung an den Begriff Pixel entstanden und soll die taktile Rückmeldung verdeutlichen. Jeder der Taxel soll einzeln ansteuerbar sein. Hierdurch könnten nicht nur feste Tasten bei Bedarf eingebildet werden, sondern an jeder Stelle könnte zu jedem beliebigen Zeitpunkt eine Taste in jeder denkbaren Größe und Form erzeugt werden. Wie dies aussehen könnte, zeigt Abbildung 2-4. Für solche Aktoren sind jedoch neue Herstellverfahren nötig, um entsprechend filigrane Aktoren mit der nötigen Genauigkeit herzustellen. Ebenso müssten die Aktoren noch leistungstärker werden, d. h. tiefere Eindellungen erzeugen

können. Auch wäre durch die Verwendung transparenter Materialien mit entsprechenden Eigenschaften denkbar, die Aktoren beispielsweise direkt auf einem Display anzubringen, was weitere Anwendungsfälle denkbar macht, gerade wenn man an die Entwicklung der Tablet-PCs denkt.

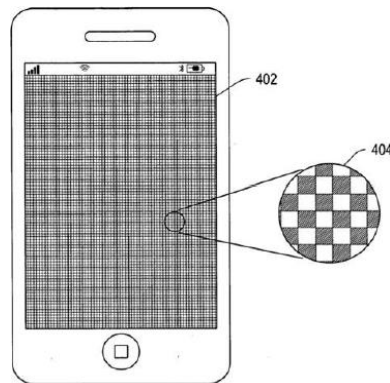


Abbildung 2-4: Multi-Touch-Display, aufgebaut aus Taxeln (Terlizzi & Minoo, 2009)

Ein weiterer Vorteil der DEA ist, dass sie flexibel sind und sie sich somit unterschiedlichsten Formen anpassen können (Mößinger, Haus, Kauer, & Schlaak, 2014). So wurde beispielsweise ein DEA-Element mit 4 Flächen bereits in eine Maus integriert (vgl. Abbildung 2-5), um ein taktiler Feedback im Bereich der Handfläche zu erzeugen (Mößinger et al., 2014). Durch die Flächen kann die Aufmerksamkeit des Nutzers in eine bestimmte Richtung gelenkt werden (Mößinger et al., 2014). Erste Tests bestätigen bereits eine verbesserte Leistung durch die Unterstützung des Nutzers durch die taktile Maus, beispielsweise bei Navigationsaufgaben (Mößinger et al., 2014).

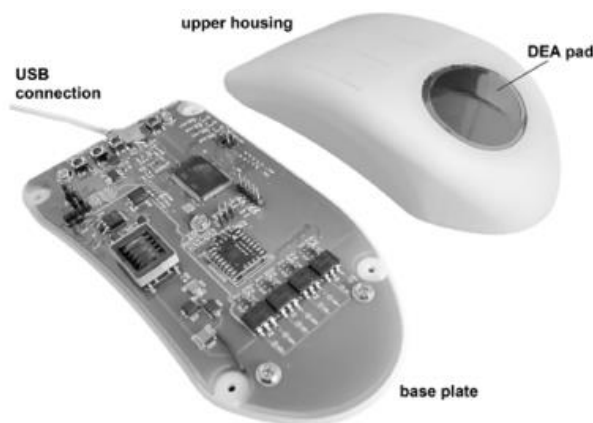


Abbildung 2-5: Beispielanwendung eines DEA: Maus mit taktilem Feedback (Mößinger et al., 2014)

## 2.2. Taktile Wahrnehmung

Die taktile Wahrnehmung ist, wie die Kinästhetik, Teil der Haptik. Die detaillierte Definition erfolgt im nächsten Abschnitt.

### 2.2.1. Definition

Nach DIN EN ISO 9241-910:2011 unterteilt sich die Haptik in Berührung (taktil/kutan) und Kinästhetik (siehe Abbildung 2-6).

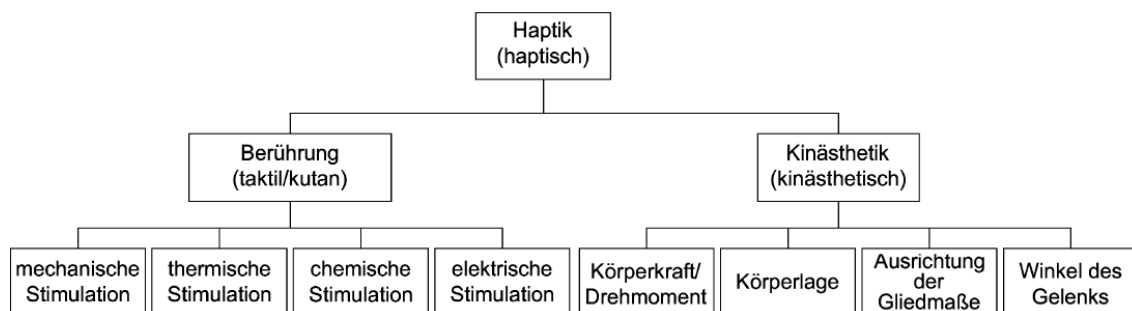


Abbildung 2-6: Unterteilung der Haptik nach DIN EN ISO 9241-910:2011

Die taktile Wahrnehmung beschäftigt sich dabei mit der Verarbeitung der Signale, welche die Mechanorezeptoren in der menschlichen Haut liefern. Kinästhetische Wahrnehmung entsteht im Gegensatz dazu durch die Wahrnehmung von Signalen der Rezeptoren in Muskeln, Gelenken und Sehnen (S J Lederman & Klatzky, 2009; Loomis & Lederman, 1986).

Im Bereich der Haptik können Informationen über Druck, Vibration und relative Stellung der Gelenke übermittelt werden (R. L. Klatzky, Lederman, & Reed, 1989).

Um zu unterscheiden, ob man sich im Bereich der taktilen Wahrnehmung oder im Bereich der Kinästhetik befindet, werden Objekte nach (Louw, Kappers, & Koenderink, 2002) in zwei Gruppen unterteilt:

- einige Millimeter groß, rein durch die Deformation der Fingerkuppe erfasst – daher rein taktil;
- Objekte mit größerer Abmessung, welche zum Abtasten eine Bewegung von Hand-, Ellbogen- und/oder Schultergelenk bedingt – kinästhetisch.

Da die DEA derzeit nur sehr kleine Flächen sind und die Auslenkungen gering sind, handelt es sich hierbei um rein taktile Wahrnehmung. Die kinästhetische Wahrnehmung wird daher nicht weiter betrachtet.

Die taktile Wahrnehmung unterteilt sich nochmals in die Bereiche mechanische, thermische, chemische und elektrische Stimulation. Für die Untersuchung der DEA ist lediglich die mechanische Stimulation von Relevanz.

### 2.2.2. Taktile Wahrnehmung beim Menschen

Für die taktile Wahrnehmung beim Menschen sind unterschiedliche Rezeptoren zuständig. Diese und deren Verteilung im Bereich der Hand werden im Folgenden näher erläutert.

#### Taktile Sensoren

Die Sensoren der taktilen Wahrnehmung werden auch als Mechanosensoren oder Rezeptoren bezeichnet. Sie reagieren bei direktem Kontakt mit der Hautoberfläche und nehmen mechanische Einflüsse wie Druck, Gewicht oder Vibrationen wahr (Reisinger, 2009).

Insgesamt sind vier unterschiedliche Mechanosensoren für die taktile Wahrnehmung verantwortlich:

- Meissner-Körperchen,
- Merkel-Zellen,
- Pacini-Körperchen,
- Ruffini-Körperchen (Zimmermann, 2005).

Diese befinden sich in jeweils unterschiedlichen Hautschichten. Abbildung 2-7 zeigt die Verteilung der Rezeptoren über die verschiedenen Hautschichten.

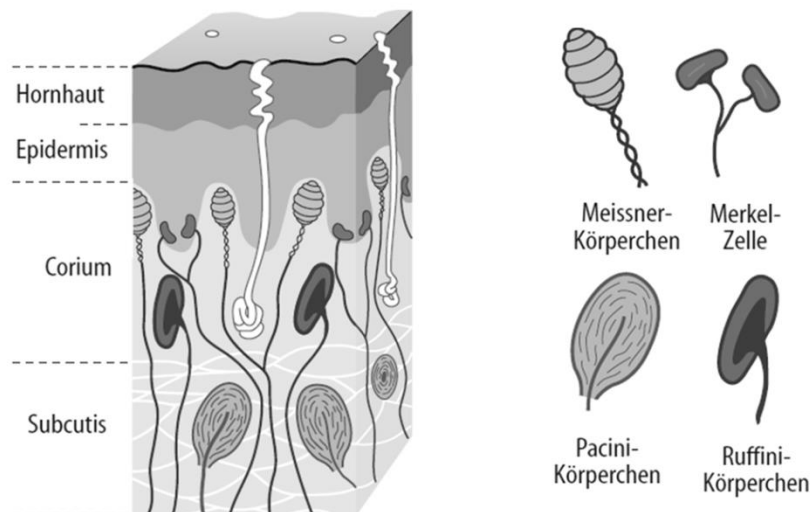


Abbildung 2-7: Lage der taktilen Sensoren in den Hautschichten bei unbehaarter Haut (Zimmermann, 2005)

Die Rezeptoren werden weiter untergliedert in *slowly adapting* (SA), also sich langsam adaptierende Rezeptoren, und *rapid* bzw. *fast adapting* (RA bzw. FA), also schnell adaptierende Rezeptoren (Schmidt & Lang, 2005).

SA-Rezeptoren sind für die Wahrnehmung von Reizen zuständig, welche über einen längerfristigen Zeitraum anhalten, und leiten den Reiz auch über diese längere Zeitspanne als neurologisches Signal weiter (Eisele,

---

2010; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983; Zimmermann, 2005). Zu den SA-Rezeptoren gehören die Merkel-Zellen und die Ruffini-Körperchen.

FA-Rezeptoren reagieren auf bewegte mechanische Hautreize (Zimmermann, 2005). Bei unbewegten Reizen ist dagegen von FA-Rezeptoren nur eine Reaktion zu Beginn und zu Ende des Reizes zu erwarten, da sich die Adaptation bereits nach 50–500 ms einstellt (Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Zu den FA-Rezeptoren gehören die Meissner- und die Pacini-Körperchen.

Im Folgenden wird auf die vier Rezeptoren im Detail eingegangen.

Die Merkel-Zellen gehören zu den SA-Rezeptoren und werden auch als SA I bezeichnet (Eisele, 2010; Zimmermann, 2005). Sie liegen in den oberflächennahen Hautarealen und kommen in den Teilen der Haut einzeln vor (Eisele, 2010). In der Fingerkuppe, welche für diese Arbeit relevant ist, sind sie besonders häufig zu finden (Eisele, 2010). Sie sind oval und haben scharfe Konturen (Halata & Baumann, 2008; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Ihr Durchmesser beträgt durchschnittlich 3,7 mm, die durchschnittliche Fläche 11 mm<sup>2</sup> (R. S. Johansson & Vallbo, 1980). Merkel-Zellen detektieren vor allem Zug und Druck. Die dabei resultierenden Aktionspotenziale sind proportional, sodass sie feststellen können, wie tief die Haut eingedrückt wird (Eisele, 2010; Zimmermann, 2005). Für das Wahrnehmen von Vibrationen sind Merkel-Zellen nur bedingt geeignet, da sie nur auf Frequenzen unterhalb von 30 Hz ansprechen (Bolanowski, Gescheider, Verrillo, & Checkosky, 1988). Sehr gut eignen sie sich jedoch, dank ihres hohen räumlichen Auflösungsvermögens, zur Wahrnehmung räumlicher Unterschiede und zur Formwahrnehmung (Eisele, 2010; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983).

Ruffini-Körperchen, auch SA-II-Mechanorezeptoren genannt, liegen in den tieferen Hautschichten (Eisele, 2010). Sie sind bis zu fünfmal größer als Merkel-Zellen oder Meissner-Körperchen und haben keine definierte Kontur (R. S. Johansson & Vallbo, 1980; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Die Sensibilität der Ruffini-Körperchen ist in der Zellmitte besonders hoch und fällt zum Rand hin ab (Eisele, 2010; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Daher sind sie wenig an der Formwahrnehmung beteiligt und besitzen ein schlechtes räumliches Auflösungsvermögen (Eisele, 2010; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Wie die Merkel-Zellen reagieren sie reizproportional und nehmen dabei die Dehnung der Haut richtungsempfindlich wahr (Kern, 2009; Reisinger, 2009).

Meissner-Körperchen gehören zu den FA-Rezeptoren und werden mit FA I bezeichnet. Sie befinden sich ausschließlich in den oberflächennahen Hautschichten der unbehaarten Haut und sind rund oder oval geformt (Eisele, 2010; Halata & Baumann, 2008). Ähnlich den SA-I-Rezeptoren sind sie klein und haben eine genau definierte Kontur (Eisele, 2010; Halata & Baumann, 2008). Meissner-Körperchen verhalten sich geschwindigkeitsproportional, d. h., sie reagieren auf schnelle mechanische Reize stärker als auf langsame Reize. Sie eignen

sich gut für die Wahrnehmung räumlicher Details von Objekten und reagieren bereits auf Reize, welche wenige  $\mu\text{m}$  groß sind (Halata & Baumann, 2008; R. S. Johansson & Vallbo, 1980). Meissner-Körperchen sprechen auf Frequenzen zwischen 10 und 60 Hz an (Bolanowski et al., 1988).

Pacini-Körperchen gehören ebenfalls zu den FA-Rezeptoren und werden FA II genannt. Sie haben einen Durchmesser von etwa 11 mm und eine durchschnittliche Fläche von  $100 \text{ mm}^2$  (R. S. Johansson & Vallbo, 1980). Wie auch bei den SA-II-Rezeptoren sind ihre Grenzen nicht stark definiert; somit tragen sie wenig zur Lokalisierung der Reize bei (Eisele, 2010; Roland S. Johansson & Vallbo, 1983). Sie sind besonders sensitiv für die Wahrnehmung von Hautdehnungen (R. S. Johansson & Vallbo, 1980). Pacini-Körperchen reagieren beschleunigungsabhängig (Bolanowski et al., 1988; Kern, 2009; Reisinger, 2009). Sie sprechen auf Frequenzen oberhalb von 60 Hz an und werden daher auch als Vibrationssensoren bezeichnet (Zimmermann, 2005).

Eine Übersicht der vier Rezeptoren mit ihren Eigenschaften kann Tabelle 2-1 entnommen werden.

Tabelle 2-1: Übersicht über die Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung mit ihren Eigenschaften

Rezeptorname	Typ	Größe	Kontur	Wahrgenommenes Signal	Frequenzbereich
Merkel-Zelle	SA I	$11,0 \text{ mm}^2$	scharf	Druck, Druckänderungsgeschwindigkeit	< 30 Hz
Ruffini-Körperchen	SA II	$58,9 \text{ mm}^2$	unscharf	Druck	< 30 Hz
Meissner-Körperchen	FA I	$12,6 \text{ mm}^2$	scharf	Druckänderung	10–60 Hz
Pacini-Körperchen	FA II	$101,3 \text{ mm}^2$	unscharf	Druckänderungsgeschwindigkeit	ab 60 Hz

## Verteilung der Rezeptoren

Im Folgenden wird kurz auf die Verteilung der Rezeptoren eingegangen. Hierbei wird nur der Bereich von Finger und Hand betrachtet, da dies für die in dieser Arbeit betrachteten Interaktionskonzepte ausreichend ist.

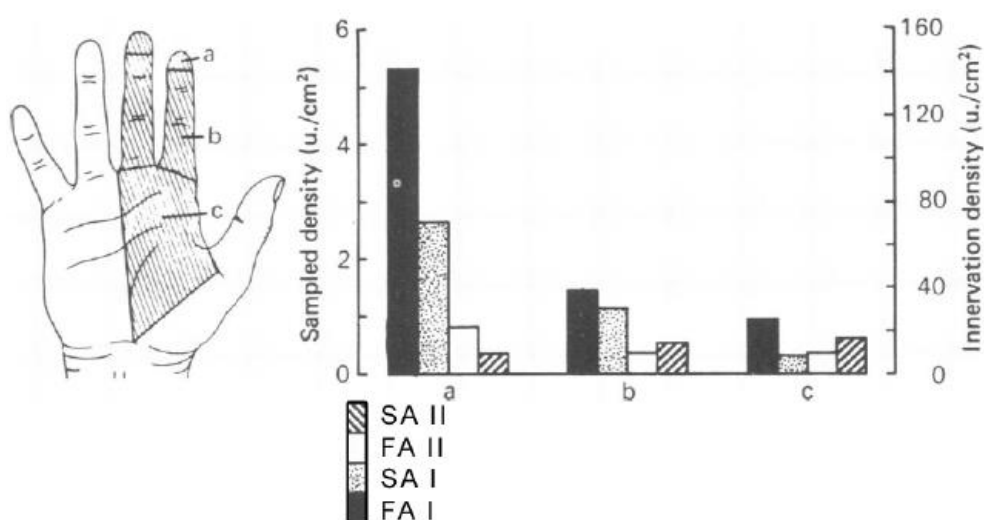


Abbildung 2-8: Verteilung der Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung in unterschiedlichen Bereichen der Hand (R. S. Johansson & Vallbo, 1979)

---

Betrachtet man deren Verteilung der vier Rezeptorarten, welche für die taktile Wahrnehmung verantwortlich sind, so wird deutlich, dass insbesondere in der Fingerspitze die Dichte an FA-I-Rezeptoren besonders hoch ist (vgl. Abbildung 2-8). Sie detektieren Druckveränderungen. Die zweithöchste Dichte im Bereich der Fingerspitze weisen die SA-I-Rezeptoren auf, welche Druck detektieren. Die Konzentration der FA-II- und der SA-II-Rezeptoren ist dagegen relativ gering. In den Bereichen der Finger und der Handfläche (vgl. Abbildung 2-8) ist die Dichte aller Rezeptoren jeweils deutlich geringer als im Bereich der Fingerspitze. Daher ist die Fingerspitze mit der höchsten Rezeptordichte am besten für die taktile Wahrnehmung geeignet.

---

### 2.3. Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Arbeit

In den Studien 1, 2 und 5 ist die Form der konkaven Form Teil der Untersuchung. Bei diesen Versuchen wird zwischen dem Wahrnehmen und dem Erkennen der Form unterschieden. *Wahrnehmen* bedeutet, dass ein Proband eine Eindellung ertastet hat. *Erkennen* hingegen beinhaltet, dass der Proband die richtige Form identifiziert hat, also einen Kreis als Kreis erkannt hat, ein Dreieck als Dreieck usw.

Ebenso werden die Begrifflichkeiten *geführt* und *ungeführt* verwendet. In den Studien 1 und 5 handelt es sich um geführte Bewegungen. Hierbei wurde der Proband mithilfe einer Orientierungslinie entlang der Formen „geführt“, um ein überstreichen der Formen zu gewährleisten. Bei Studie 2 hingegen handelt es sich um eine ungeführte Bewegung. Dies bedeutet, dass es, anders als in den Studien 1 und 5, keine Orientierungslinie gab. Der Proband tastete die Flächen frei ab.



---

## **2.4. Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung**

Die taktile Wahrnehmung ist von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einflussgrößen unterteilt in technische Einflussgrößen, menschbezogene Einflussgrößen und Störgrößen.

Bei den technischen Einflussgrößen handelt es sich um die Parameter, welche von den DEA bestimmt werden. Sie sind durch die Technik auf einen bestimmten Bereich begrenzt. Menschbezogene Einflussgrößen sind vom Nutzer selbst abhängig. Störgrößen sind äußere Einflussfaktoren, welche die taktile Wahrnehmung negativ beeinflussen können.

Die einzelnen Einflussgrößen werden im Folgenden näher erläutert.

### **2.4.1. Technische Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung**

Die technischen Einflussgrößen werden durch die DEA vorgegeben. Sie sind nicht konstant, sondern können im Rahmen der technischen Möglichkeiten variiert werden. Die technischen Einflussgrößen werden im Folgenden näher beschrieben.

#### **Abstand zwischen zwei taktilen Feedbacks**

Im statischen Bereich gibt es bereits Studien, die untersuchen, welchen Abstand zwei Reize haben müssen, um als zwei Reize wahrgenommen zu werden. Diese Grenze, ab welcher zwei statische Reize als zwei Reize wahrgenommen werden, nennt man Zweipunktschwelle. Wird der als Zweipunktschwelle bezeichnete Abstand unterschritten, so werden die zwei Reize nur als ein einzelner Reiz wahrgenommen. Eine Übersicht für die Zweipunktschwellen unterschiedlicher Körperbereiche ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

Die Zweipunktschwelle wird ermittelt, indem ein Tastzirkel mehrmals an unterschiedlichen Stellen der Haut aufgesetzt wird (siehe Abbildung 2-9, links). Der Abstand der Spitzen des Tastzirkels wird dabei variiert. Es wird mit einem großen Abstand begonnen. Dieser wird schrittweise verringert, bis der Proband nur noch einen Druckpunkt wahrnimmt. Der Abstand, bei welchem der Proband erstmals nur noch einen Druckpunkt wahrnimmt, wird als Zweipunkt oder Zweipunktschwelle bezeichnet (Schmidt & Lang, 2005).

Die Zweipunktschwelle ist zum einen stark abhängig von der Körperregion, da die Dichte der Rezeptoren in den einzelnen Körperregionen sehr unterschiedlich ist. So liegt die Zweipunktschwelle im Bereich der Handfläche bei ca. 15 mm und am Rücken bei über 60 mm (Silbernagl, 2007).

Die Zweipunktschwelle der Finger ist für die Anwendung der DEA derzeit besonders relevant. Die angegebenen Werte für diese variieren jedoch in der Literatur. Silbernagl (2007) gibt an, dass die Zweipunktschwelle für

Finger und Lippen bei etwa 1 mm liegt. Andere Quellen geben deutlich davon abweichende Werte an. Nach Grunwald/Beyer (2001) stellte 1846 E.H. Weber, der erste Wissenschaftler, der die Zweipunktschwelle untersuchte, Werte von 2–2,3 mm bei erwachsenen Probanden fest. Andere Untersuchungen liefern Ergebnisse von etwa 3 mm für die Zweipunktschwelle (Schmidt & Lang, 2005).

Eine praktische Anwendung, für welche die Zweipunktschwelle eine große Rolle spielt, ist die Brailleschrift, ein Punktschriftsystem für Sehbehinderte und Blinde. Bei der Brailleschrift liegen die Erhebungen 2,3 mm auseinander, weshalb davon auszugehen ist, dass die Zweipunktschwelle unterhalb 2,3 mm liegt (Grunwald & Beyer, 2001).

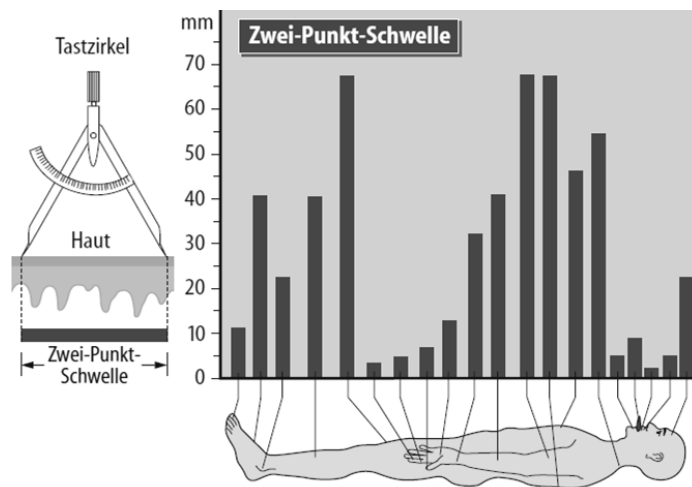


Abbildung 2-9: Zweipunktschwellen unterschiedlicher Hautbereiche (Zimmermann 2005)

Betrachtet man die menschlichen Rezeptoren, welche die Zweipunktschwelle beeinflussen, so handelt es sich hierbei um die Meissner-Körperchen und die Merkel-Zellen. Deren maximale Sensitivität liegt in ihrem Zentrum und nimmt zum Rand hin schnell ab. Da die Zellenzentren auf der Fingerkuppe nur etwa 0,9–1,3 mm voneinander entfernt sind, können geringere Abstände rein physiologisch nicht wahrgenommen werden (Grunwald & Beyer, 2001). Die Zweipunktschwelle ist also stark von der Rezeptordichte abhängig, welche im Bereich der Fingerkuppe am höchsten ist (Goldstein, 2007; Klink & Silbernagl, 2001).

Eine Studie von (Phillips & Johnson, 1981) bestätigt dies. In dieser Studie wurde ebenfalls untersucht, welche minimale Distanz zwei Erhebungen aufweisen müssen, um gut differenzierbar zu sein. Konkret wurde hierbei die Reaktion von SA- und FA-Rezeptoren untersucht. Dafür wurden Stimuli mit Ecken und Kanten über diese bewegt. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bei Formabständen unter 0,75 mm keine Differenzierung stattfindet. Erst ab einem Abstand von 3 mm ist die Wahrnehmung unabhängig von der vorherigen Kante (Phillips & Johnson, 1981).

---

## Druck

Der menschliche Finger kann Druck im Bereich von 30 g bis 780 g aufbauen (Susan J. Lederman & Taylor, 1972). Der Druck hat einen großen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung. Durch höheren Druck erhöht sich, bei konvexen Formen, die Tiefe, mit welcher ein Gegenstand in die Haut eindringt (Craig & Sherrick, 1969; Katz, 1969). Dadurch erhöht sich die Kontaktfläche zwischen Gegenstand und Haut, was die Wahrnehmung verbessert (Craig & Sherrick, 1969; Katz, 1969).

Beim Ertasten von Formen und Strukturen wird die Wahrnehmung durch den Druck beeinflusst, mit welchem die Abtastung erfolgt. Beim Abtasten von Texturen beispielsweise tastet der Mensch die Oberfläche mit durchschnittlich 1,1 N ab, wobei Druckkräfte zwischen 0,3 und 4,5 N auftreten. Liegt die Abtastkraft in diesem Bereich, so verbessert sich das Auflösungsvermögen um das 1000-fache gegenüber Abtastkräften außerhalb dieses Bereiches (Caldwell, Lawther, & Wardle, 1996; Lawther, 1995).

## Form der Eindellung

Eine der Hauptfunktionen des haptischen Sinneskanales ist die Erkennung von Formen und Objekten. Diese wird insbesondere durch die Fingerspitzen und die Hand realisiert (Johnson & Hsiao, 1992; Loomis & Lederman, 1986). Durch den Kontakt zwischen dem Objekt und der Haut werden die sich in der Haut befindlichen Mechanorezeptoren angesprochen und die wichtigsten Komponenten des Objektes wahrgenommen und erkannt (Johnson & Hsiao, 1992). Dies wird bereits genutzt, z. B. bei der Brailleschrift. Bisher ist über die Prozesse, welche zur Wahrnehmung und Erkennung von Formen führen, wenig bekannt (S. Ballesteros, Millar, & Reales, 1998). Bestätigt ist, dass Ecken und Kanten eine maßgebliche Rolle bei der Erkennung von Objekten spielen (Gibson, 1962). Die Komplexität der Stimuli nimmt jedoch mit steigender Zahl an Ecken und Kanten zu (Locher & Simmons, 1978). Dadurch erhöht sich auch die Zeit, die benötigt wird, um eine Form zu erkennen (Locher & Simmons, 1978).

Eine häufig gestellte Frage beschäftigt sich damit, um wie viel eine Form größer sein muss, um erkannt und nicht nur wahrgenommen zu werden. Die Literatur gibt Hinweise darauf, dass die Erkennungswerte dreimal höher liegen als die Wahrnehmungswerte (Louw et al., 2002). Dies bedeutet, dass eine Form, welche beispielsweise ab 5 mm Formgröße wahrgenommen wird, ab 15 mm Formgröße erkannt wird.

Insgesamt ist die Thematik der Erkennung von Formen in der Literatur noch nicht umfangreich behandelt (Louw et al., 2002). Es gibt hierzu jedoch einige Studien. So beschäftigte sich Gibson (1962) in einem Versuch mit der Erkennung von Formen, indem er Plätzchenformen unterschiedlicher Konturen von Probanden abtasten ließ. Die Probanden wurden im Anschluss gebeten, die Formen (siehe Abb. Abbildung 2-10) anhand von Bildern zu identifizieren. Es handelte sich hierbei um zweidimensionale Formen, welche alle dieselbe Höhe aufwiesen. Der Fokus der Studie lag jedoch auf dem Unterschied zwischen *active touch*, also dem aktiven Ab-

tasten der Formen durch den Probanden, und *passive touch*, bei welchem der Finger des Probanden stillsteht und die abzutastende Form bewegt wird. Die Studie zeigt, dass vor allem die Ecken und Kanten maßgeblich sind für die Erkennung der Form (Gibson, 1962). Dies wurde durch spätere Versuche von (Lakatos & Marks, 1999) bestätigt, welche aufzeigen, dass am ehesten Eigenschaften wie scharfe Ecken oder Konturen beim Er-tasten von Objekten herausstechen.



Abbildung 2-10: Formen für die Bildererkennung in der Studie von (Gibson, 1962)

Wichtig für die Erkennung des Objektes ist auch die Ausrichtung der Form zum Probanden hin. Je nachdem, ob die Form horizontal, vertikal oder schräg zum Probanden hin ausgerichtet ist, gibt es signifikante Unterschiede in der Formerkennung (S. Ballesteros et al., 1998). Dies wird durch die Versuche von (Johnson & Hsiao, 1992) nochmals verdeutlicht. Betrachtet man die Reaktion eines SA-I-Rezeptors auf die Abtastung erhabener Buchstaben, welche in diesem Fall 6 mm aus der Oberfläche hervorstehen, so zeigt sich das Reaktionsmuster in Abbildung 2-11. Dies verdeutlicht, dass Merkmale von Formen, welche sich hinter geraden, zur Strichrichtung des Fingers parallel liegenden Kanten befinden, nur sehr schlecht wahrgenommen werden (siehe beispielsweise B, D oder P) (Johnson & Hsiao, 1992).



Abbildung 2-11: Reaktion eines SA-I-Rezeptors beim Abtasten von Buchstaben (Johnson & Hsiao, 1992)

### Frequenz des Feedbacks

Für die Wahrnehmung unterschiedlicher Frequenzen sind die Pacini-Körperchen maßgeblich verantwortlich (Grunwald, 2008). Diese reagieren auf Frequenzen im Bereich von 100 bis 400 Hz (siehe auch Abschnitt 2.2.2), und dies bereits bei einer Verformung der Haut von weniger als 3 µm (Silbernagl, 2007).

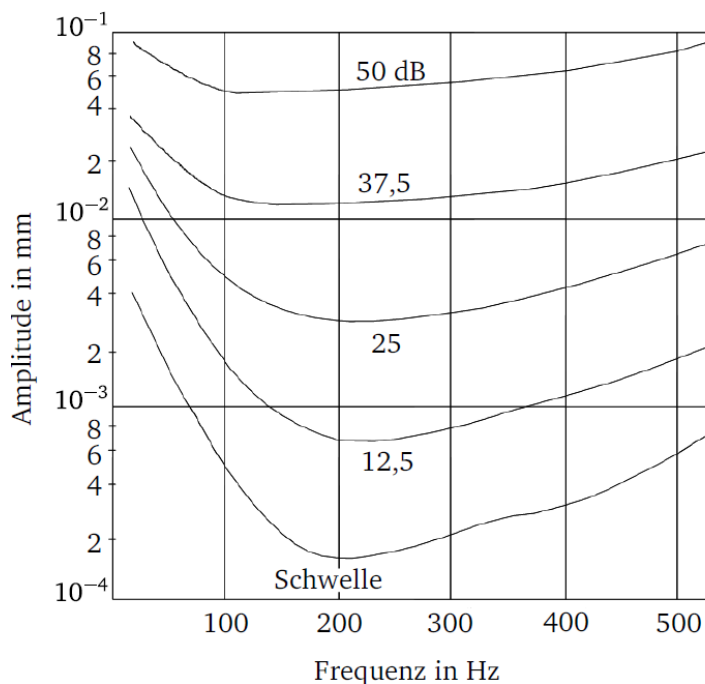


Abbildung 2-12: Schwellwerte für die Wahrnehmung von Schwingungen in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz nach (Hugony, 1935)

Wie Abbildung 2-12 zeigt, liegt der Bereich der größten Sensibilität bei etwa 200 Hz. Vibrationsamplituden werden hier bereits ab 0,1  $\mu\text{m}$  wahrgenommen (Grunwald, 2008). Ältere Studien besagen, dass der Bereich der idealen Frequenz bei 250 Hz liegt und Vibrationen hier ab einer Amplitude von 0,16  $\mu\text{m}$  wahrgenommen werden (Verrillo, 1985).

### Größe der Form

Eine der grundlegenden Fragen der taktilen Wahrnehmung ist es, ab welcher Abmessung eine Form wahrgenommen bzw. erkannt werden kann. Zu den Abmessungen gehören die Größe der Form sowie die Tiefe.

Betrachtet man nur die Größe der Form, so kann man sich für die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung gut an der Brailleschrift orientieren, welche in der Praxis bereits erprobt ist. Für die Größe der Braille-Punkte wird in der Literatur ein Minstdurchmesser von 1,5 mm empfohlen (Library of Congress, 2008). Daher ist anzunehmen, dass Formen mit einer Größe von 1,5 mm bereits gut wahrgenommen werden. Um die Informationen jedoch zu verarbeiten und zu erkennen, empfiehlt die Literatur eine Größe von mindestens 5 mm (Nolan & Morris, 1971). Eine Erkennung von Formen wird daher ab 5 mm Formgröße als möglich ist erachtet.

---

Die Grenzen der Wahrnehmung bezüglich der Größe einer Form sind jedoch nicht unabhängig von der Tiefe bzw. der Höhe der Form. Näheres hierzu kann dem Abschnitt *Tiefe der Form* in diesem Kapitel entnommen werden.

### **Kantenschärfe der Eindellung**

Hinweise darauf, dass die Kantenschärfe einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung hat, können in der Literatur im Zusammenhang mit der Zweipunktschwelle gefunden werden. So zeigte eine Studie von (Grunwald & Beyer, 2001), dass die minimal mögliche Zweipunktschwelle durch die FA-I-Rezeptoren (Meissner-Körperchen) und die SA-I-Rezeptoren (Merkel-Zellen) festgelegt wird. Innerhalb der rezeptiven Felder dieser Rezeptoren heben sich die Punkte mit maximaler Sensitivität ab, zum Rand hin sinkt die Sensitivität ab. Daraus ergibt sich, dass die Rezeptoren gegenüber scharfen Kanten und Konturen besonders sensitiv sind (Grunwald & Beyer, 2001).

Auch (Gibson, 1962) bestätigt, dass Ecken und Kanten eine maßgebliche Rolle, besonders bei der Erkennung von Objekten, spielen. Jedoch nimmt die Komplexität der Stimuli mit steigender Zahl an Ecken und Kanten deutlich zu, wodurch die Zeit, welche benötigt wird, um ein Objekt zu erkennen, sich erhöht (Locher & Simmons, 1978).

### **Material der Oberfläche des Testgerätes**

Materialien können die taktile Wahrnehmung ebenfalls beeinflussen. Als relevante Werkstoffeigenschaften werden hierbei die Rauigkeit, die Härte, die Nachgiebigkeit, der Reibbeiwert und die thermische Leitfähigkeit des Werkstoffes angesehen (Bergmann Tiest & Kappers, 2006). Allerdings ist der Einfluss der einzelnen Werkstoffeigenschaften auf die taktile Wahrnehmung bisher nicht vollständig geklärt. Einzig die Erkenntnis, dass rau/glatt und hart/weich Eigenschaften sind, welche die Wahrnehmung beeinflussen, ist bisher bekannt (Johnson & Hsiao, 1992). Sie sind jedoch kaum qualifizierbar (Johnson & Hsiao, 1992).

Von den genannten Werkstoffeigenschaften ist der Einfluss der *Rauigkeit* auf die taktile Wahrnehmung der in der Literatur am meisten erforschte (Roberta L. Klatzky & Lederman, 1999; Susan J. Lederman, 1974; Loomis & Lederman, 1986). Die Rauigkeit wird im Bereich der Haptik als Höhendifferenz auf einer Oberfläche bezeichnet (Bergmann Tiest & Kappers, 2006). Häufig wird sie mit der Nachgiebigkeit in Verbindung gebracht. Der Grund dafür ist, dass bei der Betrachtung alltäglicher Materialien auffällt, dass weiche Materialien oft rau (z. B. ein Schwamm) und harte Gegenstände wie Metall hingegen oft glatt sind (Bergmann Tiest & Kappers, 2006). Es wird vermutet, dass die wahrgenommene Rauigkeit der Oberfläche abhängig von der Vibration ist, welche von

---

den Probanden bei der Abtastung einer Oberfläche durch die Relativbewegung von Haut und Gegenstand entsteht (Roberta L. Klatzky & Lederman, 1999).

Des Weiteren spielt die *Nachgiebigkeit* des Materials eine große Rolle (Bergmann Tiest & Kappers, 2006; R. L. Klatzky et al., 1989). Die Nachgiebigkeit ist dabei definiert als Druck bzw. Kraft, die benötigt wird, um einen Gegenstand um eine bestimmte Länge zu verformen (Bergmann Tiest & Kappers, 2006; S J Lederman & Klatzky, 2009). Somit ist sie mit der physikalischen Größe des Elastizitätsmoduls verbunden (Bergmann Tiest & Kappers, 2006; S J Lederman & Klatzky, 2009).

Die Reibung hat ebenfalls einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung. Sie ist eng mit der Rauigkeit verbunden, jedoch haben Versuche gezeigt, dass die Eigenschaften Rauigkeit und Reibung unabhängig voneinander sind (Hollins, Bensmaïa, Karlof, & Young, 2000; Miyaoka, Mano, & Ohka, 1999; Taylor & Lederman, 1975). Reibung entsteht bei einer Relativbewegung zwischen zwei Flächen und besteht physikalisch betrachtet aus dem Verhältnis von Normalkraft zu Reibkraft (Taylor & Lederman, 1975). Wie Taylor/Ledermann (1975) zeigen, korreliert die Reibung nicht mit der wahrgenommenen Rauigkeit der Oberfläche. Taylor/Ledermann (1975) zeigen, dass eine Verringerung des Reibkoeffizienten durch das Auftragen von Öl auf die Oberfläche bei den Probanden nicht zu einer Änderung der wahrgenommenen Rauigkeit führt. Dies wird durch weitere Studien bestätigt (Miyaoka et al., 1999).

In der Literatur finden sich viele Versuche, die sogenannten Multi-Dimension-Scaling-Versuche, bei welchen die Probanden gebeten werden, Sinneseindrücke in mehrere Dimensionen zu gliedern und so Skalen für die taktilen Sinneseindrücke zu erstellen. Dabei werden jeweils unterschiedliche Werkstoffeigenschaften variiert. Bei allen diesen Versuchen wird die Dimension rau/glatt als die am stärksten ausgeprägte Dimension identifiziert und ist somit der wichtigste Faktor bei der Wahrnehmung von Oberflächen. In einer Studie von (Hollins et al., 2000) wurde beispielsweise festgestellt, dass es drei Dimensionen gibt, welche von den Probanden genannt werden: rau/glatt, hart/weich, klebrig/rutschig. Für die Existenz der Dimensionen warm/kühl und formbar/elastisch konnte in dieser Studie kein Nachweis gefunden werden (Hollins et al., 2000). Eine andere Studie, durchgeführt von (Picard, Dacremont, Valentin, & Giboreau, 2003), fand hingegen vier Dimensionen, welche mit soft/harsh, thin/thick, relief und hardness bezeichnet werden. Dies kann im Deutschen übersetzt werden mit weich/hart, dick/dünn, Rauigkeit und Härte. In der 2006 von Bergmann Tiest/Kappers durchgeführten Studie hingegen konnten allerdings nur Rauigkeit und Verformbarkeit als von den Probanden wahrgenommene Werkstoffeigenschaften identifiziert werden (Bergmann Tiest & Kappers, 2006).

Die Literatur gibt, wie oben beschrieben, Hinweise darauf, dass die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von Probanden wahrgenommen werden können. Allerdings liefert sie noch keine Hinweise darauf, wie die

---

einzelnen Werkstoffeigenschaften die Grenzen der Wahrnehmung beeinflussen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf die Wahrnehmungsgrenzen existiert.

### **Tiefe der Eindellung**

In der Literatur gibt es wenige Studien, die sich mit der Wahrnehmungsschwelle von konkaven Formen beschäftigen. Einzelne Studien gibt es jedoch, die konkave und konvexe Formen vergleichen. So gibt es Hinweise in der Literatur, dass die Wahrnehmungsgrenze für konvexe und konkave Formen gleich hoch ist (Goodwin, John, & Marceglia, 1991; Louw, Kappers, & Koenderink, 2000; Louw et al., 2002).

Geht man davon aus, dass konvexe und konkave Formen gleich gut wahrgenommen werden, so kann man sich an der Brailleschrift als Anwendungsfall orientieren. Für die Höhe der Erhebung werden hier beispielsweise bei Grunwald & Beyer (2001) 0,4 mm empfohlen. Jedoch zeigen weitere Studien andere Empfehlungen für die benötigte Mindesthöhe bei der Brailleschrift. So werden für Medikamentenverpackungen beispielsweise Empfehlungen für die Mindesthöhe, welche je nach Land zwischen 0,25 mm und 1 mm liegen (Golob et al. 2011). Es ist daher auf Basis der Literatur davon auszugehen, dass die Grenze für die Wahrnehmung konvexer Formen im Bereich 0,25 mm und 1mm liegt. Nach der Aussage von Goodwin et al. (1991) und Louw et al. (2000, 2002), welche besagt, dass konvexe und konkave Formen sich in der Wahrnehmung nicht unterscheiden ist davon auszugehen, dass auch konkave Formen in entsprechender Tiefe wahrgenommen werden können.

Die Untergrenze für die menschliche Wahrnehmung einer Form ist in der Literatur mit einer Höhe von 1  $\mu\text{m}$  bei konvexen Formen angegeben (Louw et al., 2000). Gilt die Annahme, dass konvexe und konkave Formen gleich gut wahrgenommen werden (Goodwin et al., 1991; Louw et al., 2000, 2002), so gilt diese Grenze auch für konkave Formen. Ob es sich um eine konvexe oder eine konkave Form handelt, kann jedoch erst ab etwa dem dreifachen Wert der Wahrnehmungsgrenze erkannt werden (Louw et al., 2002).

Im Gegenzug gibt es jedoch auch Aussagen in der Literatur, dass konkave Formen stärker taktil wahrgenommen werden. Dies wird damit begründet, dass der Zeigefinger selbst eine konvexe Oberfläche hat. Hierdurch entsteht durch den Kontakt der konvexen Oberfläche des Fingers mit der konkaven Form eine größere Kontaktfläche als bei einer konvexen Form, welche in einer besseren Wahrnehmung resultiert (van der Horst & Kappers, 2008).

Die Wahrnehmungsgrenze ist jedoch nicht allein von der Höhe bzw. Tiefe der Form abhängig, sondern auch von dessen Grundfläche (R. S. Johansson & LaMotte, 1983). So kann beispielsweise ein Kreis mit einem



---

Durchmesser von 0,6 mm bereits ab 1,09  $\mu\text{m}$  Höhe wahrgenommen werden, ein Kreis mit 0,04 mm muss bereits sechsmal höher sein, um wahrgenommen zu werden (R. S. Johansson & LaMotte, 1983).

Aus der Literatur wird ebenfalls ersichtlich, dass die Wahrnehmungsgrenze stark von der Anordnung und der Form des Elementes abhängig ist. So zeigte eine Studie von (LaMotte, Robert H. & Srinivasan, Mandayam A., 1991), dass ein Punkt ab 2  $\mu\text{m}$  Höhe wahrgenommen werden kann. Handelt es sich jedoch um Oberflächenelemente, welche periodisch angeordnet sind, so ist eine Wahrnehmung bereits bei einer Formerhebung von 0,06  $\mu\text{m}$  möglich. Bei einzelnen Punkten wird eine Erhebung von mindestens 0,16  $\mu\text{m}$  als Wahrnehmungsgrenze angegeben, während Querstreifen bereits bei einer Höhe von 0,06  $\mu\text{m}$  wahrnehmbar sind (LaMotte, Robert H. & Srinivasan, Mandayam A., 1991).

#### **2.4.2. Menschbezogene Einflussgrößen auf die taktile Wahrnehmung**

Neben den technischen Parametern, welche angepasst werden können, um die taktile Wahrnehmung zu verbessern, spielen auch menschbezogene Parameter bei der taktilen Wahrnehmung eine wichtige Rolle. Hierzu gehören menschliche Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten. Die Erfassung der menschbezogenen Einflussgrößen ist wichtig, um für einen konkreten Anwendungsfall der DEA mit einer definierten Nutzergruppe die Gestaltungsrichtlinien für die Akteure entsprechend festzulegen. Die relevanten menschbezogenen Parameter werden im Folgenden dargestellt.

##### **Einfluss des Alters**

Ein wichtiger Einflussparameter für die taktile Wahrnehmung ist das Alter. Mit zunehmendem Alter nimmt die haptische Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen ab (Norman et al., 2011; Stevens & Choo, 1996). Es handelt sich dabei nicht nur um eine Verschlechterung der taktilen Wahrnehmung, sondern auch um eine mit dem Alter verringerte Fähigkeit, Vibrationen zu erkennen (Kenshalo, 1986). Ab einem Alter von etwa 50 Jahren wird eine Verschlechterung des haptischen Sinneskanals deutlich, wobei die unteren Extremitäten stärker betroffen sind als die Körpermitte und die oberen Extremitäten (Kenshalo, 1986).

Die Verschlechterung der taktilen Wahrnehmung mit zunehmendem Alter kann durch unterschiedliche Faktoren begründet werden. Wenn die menschliche Haut altert, dann verändern sich auch ihre mechanischen Eigenschaften hinsichtlich ihrer Deformierbarkeit, es kommt vermehrt zu Durchblutungsstörungen und die Anzahl der Rezeptoren nimmt mit dem Alter ab (Kenshalo, 1986; Stevens & Choo, 1996; Woodward, 1993).

Insbesondere verschlechtert sich die Sensitivität der Pacini-Körperchen mit zunehmendem Alter (Hall, Hoffman, Gescheider, Bolanowski, & Verrillo, 1994). Hierdurch wird die Wahrnehmung von Vibrationen mit zu-

---

nehmendem Alter stark beeinträchtigt. Darüber hinaus kommt es mit steigendem Alter zu einer Zunahme der Verbindungen zwischen Kollagenfasern und der Degeneration elastischer Fasern infolge von UV-Bestrahlung der Haut (Junqueira et al., 2004).

Diese unterschiedlichen Faktoren und ihr Einfluss auf die taktile Wahrnehmung wurden in verschiedenen Studien untersucht. So untersuchte (Woodward, 1993) den Einfluss der Deformationsfähigkeit der Haut mit steigendem Alter. Es konnte jedoch kein signifikanter Zusammenhang zwischen der taktilen Wahrnehmungsfähigkeit und der Deformationsfähigkeit der Haut ermittelt werden, weshalb dieser Faktor als nicht relevant angesehen wird (Woodward, 1993). Eine Studie von (Kenshalo, 1986) zeigt jedoch, dass die Anzahl und Dichte der Rezeptoren mit dem Alter stark nachlässt, was als Hauptursache für die nachlassende taktile Wahrnehmungsfähigkeit verantwortlich gemacht wird. Der Schwund der Rezeptoren kann hierbei bis zu 90 % betragen (Kenshalo, 1986).

### **Einfluss der Erfahrung**

Die taktile Wahrnehmung eines Menschen kann durch Lernen und Erfahrung in gewissen Grenzen verbessert werden, sodass eine größere Vielzahl taktiler Informationen wahrgenommen werden kann (Soledad Balasteros & Heller, 2008). Ein Beispiel für die Verdeutlichung dieses Lerneffektes ist die bessere Wahrnehmung taktiler Informationen durch Blinde. So haben vergleichende Versuche zwischen Blinden und normalsichtigen Personen gezeigt, dass taktile Informationen von Blinden deutlich besser verarbeitet werden (vgl. hierzu u. a. (Legge, Madison, Vaughn, Cheong, & Miller, 2008)). Die für Blinde ermittelten Schwellwerte der menschlichen Wahrnehmung sind deutlich niedriger als für normalsichtige Personen, und die Tastfähigkeiten werden bei Blinden im Gegensatz zu Normalsichtigen bis ins hohe Alter beibehalten, statt diese schrittweise zu verlieren (Goldreich & Kanics, 2006).

Um zu untersuchen, ob die bessere taktile Wahrnehmung von Blinden allein auf Lerneffekte zurückzuführen ist, wurden vergleichende Studien zwischen Probanden durchgeführt, welche blind geboren wurden, und solchen, welche im Laufe ihres Lebens erblindet sind. Darüber hinaus wurden die Probanden in Braille-Leser und Nicht-Braille-Leser unterschieden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass weder das Alter, in welchem die Sehkraft verloren ging, noch das Lesen von Brailleschrift einen Einfluss auf die Grenzen der Wahrnehmung hat. Dies wird damit begründet, dass Blinde in ihrem täglichen Leben wesentlich stärker auf ihren Tastsinn angewiesen sind. Dieser wird daher deutlich stärker trainiert als bei Normalsichtigen (Legge et al., 2008). Eine Untersuchung ergab, dass Blinde im Bezug auf die taktile Wahrnehmung selbst im höheren Alter die Fähigkeit von 24 Jahre alten Normalsichtigen haben (Legge et al., 2008).

---

Es ist daher davon auszugehen, dass die Erfahrung und das Training die taktile Wahrnehmung stark beeinflussen. Es ist jedoch nicht zwingend ein jahrelanges Training nötig, um die taktile Wahrnehmungsfähigkeit zu verbessern. So zeigten (Norman et al., 2011), dass bereits nach 4-facher Wiederholung eines Versuches deutliche Lerneffekte erzielt werden können.

### **Einfluss der Ermüdung der Rezeptoren/Adaptation**

Durch zu langes Einwirken eines Reizes kann es bei der taktilen Wahrnehmung zur Ermüdung der Rezeptoren kommen. Dies kann die taktile Wahrnehmung stark beeinflussen. Bei einer Anregung im Bereich der Fingerkuppe mit konstanter Frequenz und Amplitude kann es bereits nach 30 s zu einer Desensibilisierung kommen (Caldwell et al., 1996). Bei einer Einwirkdauer des Reizes, welche länger ist als 2–10 min kann ein taubes, kribbelndes Gefühl in der Fingerkuppe entstehen, welches nach Ende des Reizes noch mehrere Minuten anhält (Caldwell et al., 1996). Solche Effekte lassen sich jedoch durch pulsierende Amplituden vermeiden (Caldwell et al., 1996).

Ebenso steigt der Amplituden-Schwellwert, ab welchem eine Frequenz wahrgenommen wird, nach einer starken Reizung an. Nach einer Reizung von 10 min mit einem Reiz, welcher 6 dB über dem Schwellwert liegt, und einer Frequenz im Bereich von 10 Hz bis 250 Hz steigt der Amplitudenschwellwert um 2 dB (Gescheider & Verrillo, 1979). Liegt der Reiz 40 dB über dem Schwellwert, so steigt der Schwellwert nach 10-minütiger Anregung im Frequenzbereich 10–250 Hz sogar um 20 dB (Gescheider & Verrillo, 1979). Nach 7–25 min hat eine vollständige Adaptation stattgefunden, was bedeutet, dass der Amplitudenschwellwert nicht weiter ansteigt (Hahn, John F., 1968, 1973). Die Erholzeit beträgt etwa 2 min (Hahn, John F., 1968, 1973).

### **Fläche des für die Bedienung verwendeten Fingers**

Die Größe des für die Bedienung verwendeten Fingers hat ebenfalls Einfluss auf die taktile Wahrnehmung. Dies lässt sich damit begründen, dass größere Finger auch eine größere Hautoberfläche besitzen. Die Rezeptoranzahl ist bei jedem Menschen gleich, was bedeutet, dass die Rezeptordichte sich bei größeren Fingern verringert (Peters, Kuska, Kerkhoff, Wulfhorst, & Lenders, 2009). Die taktile Wahrnehmung ist bei hoher Rezeptordichte am besten (Goldstein, 2007), sodass die taktile Wahrnehmung bei Menschen mit größeren Fingern schlechter ausfällt.

Eine Studie von (Peters et al., 2009) bestätigt dies. Die Studie, welche ursprünglich untersuchen sollte, ob Frauen und Männer sich in ihrer haptischen Wahrnehmungsfähigkeit unterscheiden, entdeckte bei der Analyse, dass der Unterschied durch den Größenunterschied der Finger dominiert wird (Peters et al., 2009). Die Studie ergab weiterhin, dass die Anzahl der Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen bei jedem Menschen

---

konstant ist und deren Dichte daher bei kleineren Fingern höher ist (Peters et al., 2009). Hierdurch ist die taktile Wahrnehmung bei kleineren Fingern besser als bei größeren Fingern.

### **Einfluss des Geschlechts**

Im Allgemeinen wird Frauen eine bessere taktile Wahrnehmung nachgesagt als Männern. Auch in der Literatur existieren Studien, welche untersuchen, ob Männer und Frauen die gleichen haptischen Fähigkeiten besitzen (Peters et al., 2009). In der Studie von (Peters et al., 2009) wurde jedoch zusätzlich zum Geschlecht der Probanden deren Fingergröße erfasst. Bei der Analyse der Ergebnisse wurde festgestellt, dass der Einfluss des Geschlechts sich aufhebt, wenn die Fingergröße in die Analyse einbezogen wird (Peters et al., 2009). Der Einfluss des Geschlechtes wird komplett aufgehoben, allein die Größe des Fingers ist für die Unterschiede in der Wahrnehmung verantwortlich (Peters et al., 2009). Näheres hierzu kann dem Abschnitt „Fläche des für die Bedienung verwendeten Fingers“ in diesem Kapitel entnommen werden.

Es wird damit bestätigt, dass Frauen im Schnitt eine bessere taktile Wahrnehmung haben als Männer. Grund hierfür ist, dass Frauen durchschnittlich kleinere Finger haben. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Frau und ein Mann mit gleich großen Fingern eine ähnliche taktile Wahrnehmung besitzen.

### **Einfluss der Hauttemperatur**

Die Temperatur der Haut kann die taktile Wahrnehmung beeinflussen. Sie ist Schwankungen unterworfen und vor allem von der Umgebungstemperatur abhängig. Temperaturunterschiede werden vom Menschen im Bereich zwischen 30 °C und 36 °C nur bedingt wahrgenommen (Lynette A. Jones & Berris, 2002). Dieser Temperaturbereich wird daher auch als neutrale Zone bezeichnet (Lynette A. Jones & Berris, 2002).

Außerhalb der neutralen Zone werden Temperaturschwankungen von warm nach kalt schneller wahrgenommen als von kalt nach warm (L.A. Jones & Berris, 2003). (Caldwell et al., 1996) gibt an, dass Temperaturen über 40 °C immer als warm und Temperaturen unterhalb 20 °C immer als kalt empfunden werden. Sinkt die Temperatur unter 17 °C oder steigt sie über 45 °C, so wird dies vom Körper als Schmerz wahrgenommen (Zimmermann, 2005).

Durch die Abkühlung des Fingers verschlechtert sich die Durchblutung der Haut, wodurch auch die Rezeptoren schlechter versorgt werden. Dadurch kann es zu einer akuten Verschlechterung der taktilen Wahrnehmung kommen (Birbaumer & Schmidt, 2005).

Die Temperatur der Haut beträgt normalerweise zwischen 32 °C und 35 °C. In diesem Temperaturbereich können keine thermischen Veränderungen wahrgenommen werden können (Lynette A. Jones & Berris, 2002). Da jedoch üblicherweise die Raumtemperatur unterhalb von 32 °C liegt, kommt es bei der Berührung von Objek-

---

ten, welche Raumtemperatur haben, zu einem Wärmeübertrag zwischen Objekt und Haut. Wie groß dieser ist, hängt von der Wärmekapazität des Materials ab (Lynette A. Jones & Berris, 2002; S J Lederman & Klatzky, 2009). Da die Raumtemperatur im Regelfall niedriger ist als die Hauttemperatur, kühlt die Haut daher zunächst ab, bevor ihre Temperatur wieder steigt. Dies kann kurzzeitig zur Beeinflussung der Wahrnehmung führen.

### **Einfluss der Hornhaut**

Die Dicke der Hornhaut hat ebenfalls einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung. Bei der Hornhaut handelt es sich um die äußere Hautschicht, welche eine Art Trennschicht zwischen dem Körperinneren und den Umwelteinflüssen bildet. Das Horn, welches umgangssprachlich als Hornhaut bezeichnet wird, ist dabei wasserabweisend (Menche, 2007).

Die Dicke der Hornhautschicht ist nicht bei allen Menschen gleich. Dickere Hornhautschichten entstehen erst durch Reibung und Druck auf die Haut. Der Körper versucht, sich durch die Bildung der Hornhaut gegen die entstehende Reibungshitze zu schützen, und regt daher vor allem an stark beanspruchten Hautpartien die Bildung von Hornhaut an.

Je dicker das Horn, also die Schutzschicht der Haut gegen äußere Reize, desto weiter sind auch die Rezeptoren in den unteren Hautschichten von den taktilen Reizen entfernt. Der Druck auf die Sensoren und die Verformung in den Hautschichten, in welchen sich die Sensoren befinden, werden bei einem äußeren Reiz durch die Hornhaut verringert. Da die Wahrnehmung sich jedoch mit zunehmender Verformung und durch zunehmenden Druck verbessert (Craig & Sherrick, 1969), führt eine dickere Hornhaut zur Verschlechterung der taktilen Wahrnehmung.

---

## 2.5. Forschungsfragen

Die Literatur liefert bereits umfangreiche Informationen, welche zur Auslegung von Anwendungsfällen für DEA wichtig sind. So ist beispielsweise die Frage danach, welche Frequenzen sich für die Anwendung eignen, in der Literatur gut abgedeckt.

Die Literatur lässt jedoch auch einige Fragen offen und liefert teilweise widersprüchliche Ergebnisse. Für die Ableitung von Gestaltungshinweisen für die Verwendung konkaver Rückmeldungen ist es daher notwendig, weitere Versuche durchzuführen, um die offenen Fragestellungen zu klären.

Eine der offenen Fragen ist beispielsweise, ob sich die Ergebnisse aus der Literatur bezüglich Wahrnehmung und Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und Tiefe auf die Anwendung der DEA übertragen lassen. Dies scheint fraglich, da die Aktoren aus einem verformbaren Material, in diesem Fall Silikon, gefertigt werden. Die in der Literatur abgedeckten Untersuchungen zu Grenzen der Wahrnehmung und Erkennung der Formen verwenden kein derart deformierbares Material. Daher ist zu untersuchen, ob die ermittelten Grenzwerte der Literatur auf die DEA übertragen werden können. Es sind daher grundlegende Untersuchungen zu Grenzwerten der Wahrnehmung und Erkennung von konkaven Formen in Abhängigkeit von Tiefe und Größe der Form notwendig.

Für die Anwendung der DEA ist es ebenfalls wichtig, zu untersuchen, welchen Abstand zwei Aktorflächen haben müssen, um als zwei Flächen wahrgenommen zu werden. Die Übertragung der Angaben aus der Literatur zur Zweipunktschwelle scheint hierbei fraglich. Die Untersuchung der Zweipunktschwelle wird mit einem Tastzirkel durchgeführt, welcher zwei punktförmige Reize an der Fingerspitze erzeugt. Ein solch örtlich definierter Reiz kann durch die DEA nicht erzeugt werden. Daher sind grundlegende Untersuchungen notwendig, um zu untersuchen, welchen Abstand zwei benachbarte konkave Formen haben müssen, damit ein Nutzer diese als zwei Formen wahrnehmen kann.

Die Literatur hat bereits gezeigt, dass die Fingerfläche und das Geschlecht der Probanden zusammenhängen, und dass die Fingerfläche der Hauptgrund für den Unterschied der taktilen Wahrnehmung bei Männern und Frauen ist. Allerdings sollen als Ziel der Arbeit Gestaltungshinweise abgeleitet werden. Bei der Betrachtung eines möglichen Nutzerkollektivs ist im Regelfall nicht bekannt, welche Fingergröße die zukünftigen Nutzer besitzen, jedoch ist bekannt, ob es sich eher um männliche oder um weibliche Nutzer handelt. Daher wird, um eine spätere Praxistauglichkeit zu gewährleisten, in den Forschungsfragen nicht die Fingergröße, sondern das Geschlecht aufgegriffen.

Generell lassen sich die Forschungsfragen in drei Fragen zusammenfassen:

1. Welche Einfluss haben die technischen Parameter auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen?

- 
2. Welchen Einfluss haben die menschbezogenen Parameter auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaven Formen?
  3. Gibt es einen Unterschied bei der Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen?

Diese Forschungsfragen sind jedoch noch nicht detailliert genug für die eigentliche Planung und Durchführung der Versuche. Daher werden sie in Kapitel 3.1 nochmals detailliert.

---

### **3. Versuche zur Untersuchung der Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen**

---

Bevor die eigentlichen Versuche geplant werden konnten wurden die in Kapitel 2.5 dargestellten Forschungsfragen konkretisiert. Dabei wurden die 3 Forschungsfragen in weitere Teilfragen untergliedert (siehe Kapitel 3.1). Im Anschluss erfolgte die Planung von 4 Studien, welche zur Untersuchung der aufgestellten Forschungsfragen durchgeführt wurden. Sie behandelten jeweils unterschiedliche Fragestellungen. Eine Übersicht der in den einzelnen Studien untersuchten Einflussgrößen ist Tabelle 3-1 zu entnehmen. Jede der Studien wird in einem, eigenen Kapitel dargestellt (Kapitel 3.3 bis 0). Die Darstellung der durchgeführten Versuche erfolgt der besseren Übersicht wegen immer in gleicher Struktur. Zu Beginn werden die Ziele der jeweiligen Studie dargestellt. Hierbei wird erläutert, welche der Einflussgrößen aus den Forschungsfragen die jeweilige Studie untersucht. Im Anschluss erfolgen die Vorstellung des Probandenkollektivs sowie die Erläuterung der verwendeten Testkörper. Es folgen die Darstellung des Versuchsablaufes und des Versuchsaufbaus sowie die Darstellung der Ergebnisse bezüglich der untersuchten Parameter. Jede Studie schließt mit der Diskussion der durchgeführten Studie und der Ergebnisse.



---

### 3.1. Konkretisierung der Forschungsfragen

Die formulierten Fragestellungen aus Kapitel 2.5 werden im Folgenden in Unterfragen gegliedert. Diese ergaben sich auf Basis der in Kapitel 2.4 dargestellten Grundlagen. So stellt sich beim Einfluss der technischen Parameter im ersten Schritt die Frage nach der benötigten Formgröße und –tiefe zur Formwahrnehmung und Formerkennung. Diese kann auf Basis der Literatur nicht ausreichend beantwortet werden, da die Aussagen hierzu teilweise unterschiedlich und widersprüchlich sind (vgl. Kapitel 2.4). Ebenso bleiben durch die Literatur grundlegende Fragen nach der Zweipunktschwelle, Materialeinfluss und Einfluss der Form als solche für konkave Formen unbeantwortet. Daher ergeben sich für die erste Forschungsfrage folgende Unterfragen:

1. Welche Einfluss haben die technischen Parameter auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen?
  - Welche Größe muss eine konkave Form haben, um wahrgenommen zu werden?
  - Welche Größe muss eine konkave Form haben, um erkannt zu werden?
  - Wie tief muss eine konkave Form sein, um wahrgenommen zu werden?
  - Wie tief muss eine konkave Form sein, um erkannt zu werden?
  - Gelten die in der Literatur angegebenen Werte für die Zweipunktschwelle ebenso für konkave Formen?
  - Wie gut ist die Wahrnehmung und Erkennung bei unterschiedlichen Materialeigenschaften?
  - Gibt es Unterschiede bei der Wahrnehmung verschiedener Formen?
  - Gibt es Unterschiede bei der Erkennung verschiedener Formen?

Ähnliches wie für die technischen Einflussgrößen gilt auch für die menschbezogenen Einflussgrößen. So werden zwar einzelne Parameter wie Einfluss des Alters und des Geschlechtes zwar in der Literatur untersucht, dies jedoch nur für konvexe, nicht für konkave Formen. Daher ergeben sich für die zweite Forschungsfrage die folgenden Unterpunkte:

2. Welchen Einfluss haben die menschbezogenen Parameter auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaven Formen?
  - Wie gut ist die Wahrnehmung der konkaven Formen in unterschiedlichen Altersgruppen?
  - Wie gut ist die Erkennung der konkaven Formen in unterschiedlichen Altersgruppen?
  - Wie gut ist die Wahrnehmung der konkaven Formen bei männlichen/weiblichen Probanden?
  - Wie gut ist die Erkennung der konkaven Formen bei männlichen/weiblichen Probanden?

Die allgemeine Frage nach Unterschieden bei der Formerkennung und der Formwahrnehmung gliedert sich nicht weiter. Sie bleibt wie folgt bestehen:

3. Gibt es einen Unterschied bei der Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen?

---

Über die hier formulierten Forschungsfragen hinaus gibt es weitere Fragestellungen, welche für die Gestaltung von neuartigen Interaktionstechnologien mit konkavem Feedback relevant sind, aber welche durch die Literatur nicht eindeutig und nicht ausreichend abdeckt sind. Hierzu gehört beispielsweise die Frage danach, wie die Kantenschärfe die Grenzen der Wahrnehmung und Erkennung beeinflusst. Aus menschbezogener Sicht bleiben beispielsweise Fragen nach dem Einfluss der Hauteigenschaften oder der Erfahrung auf die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen unbeachtet. Dies sind Fragestellungen, welche durch weitere Versuche überprüft werden müssen.

Die Fragestellungen dienen dazu die benötigten Versuche zu planen und durchzuführen. Ebenso dienen sie als Leitfaden für die Auswertung im Anschluss. Auf die Planung der Versuche wird nun im Folgenden näher eingegangen.

---

### 3.2. Übersicht der Versuche

In allen Studien wurde auf eine Gleichverteilung des Geschlechtes geachtet. Das Alter wurde in allen Studien außer Studie 2 berücksichtigt. Bei Studie 2 kamen lediglich junge Probanden zum Einsatz.

Der Schwerpunkt der Studien 1 und 2 lag auf der Ermittlung der Grenzwerte für die Wahrnehmung und Erkennung von Formen. Hierbei wurden die Formgröße und die Formtiefe variiert.

Studie 3 untersuchte im Schwerpunkt die Zweipunktschwelle. Hierbei wurden die Formtiefen variiert, die Formgrößen waren konstant.

Tabelle 3-1: Übersicht über die Studien und die im Rahmen der Studien untersuchten Parameter

Parameter	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Studie 4
Abstand	×	×	✓	×
Form	✓	✓	×	✓
Frequenz	×	×	×	×
Größe	✓	✓	×	✓
Material	×	×	×	✓
Tiefe	✓	×	✓	✓
Alter	✓	×	✓	✓
Geschlecht	✓	✓	✓	✓

Studie 4 diente zur Untersuchung des Materialeinflusses auf die Grenzen der Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen. Hierbei wurden neben dem Material die Formgröße und die Formtiefe variiert.

---

### 3.3. Studie 1: Wahrnehmungs- und Erkennungsgrenze konkaver Formen in Silikon

Ziel von Studie 1 war es, zu untersuchen, wie groß und wie tief konkave Formen in Silikon sein müssen, um wahrgenommen und erkannt werden zu können. Ebenso wurden die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen für unterschiedliche Altersgruppen und männliche und weibliche Probanden separat betrachtet.

#### 3.3.1. Probanden der Studie 1

An der Studie nahmen insgesamt 31 Probanden teil. Es handelte sich um 16 männliche und 15 weibliche Probanden.

Die Gruppe der Probanden im Alter unter 40 Jahre umfasste 22 Probanden im Alter von 18–40 Jahren, welche im Mittel 24,82 Jahre alt waren (Standardabweichung 3,05 Jahre). Die Gruppe der Probanden über 40 Jahre beinhaltete 9 Probanden im Alter von 41–60 Jahren, welche im Mittel 50,78 Jahre alt waren (Standardabweichung 6,30 Jahre).

#### 3.3.2. Testkörper der Studie 1

Um den Einfluss der Größe und der Tiefe auf die Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen zu untersuchen, wurden mehrere Testplatten gefertigt. Auf jeder Testplatte war die Tiefe der konkaven Formen konstant. Die untersuchten Tiefen waren:

0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,8 mm
1,0 mm	1,25 mm	1,5 mm	1,75 mm	2,0 mm		

Diese Tiefen wurden aus der Literatur abgeleitet (siehe Kap. 2.4.1). Im unteren Bereich wurden die Abstände kleiner gewählt, da davon auszugehen war, dass sich mit zunehmender Tiefe die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen bei geringer Tiefe bereits bei kleinen Änderungen stark verbessert.

Bei den verwendeten Formen handelte es sich um Kreise, Dreiecke (gleichseitig) und Quadrate.

Für die Größen der Formen wurden Größen von 1 mm bis 10 mm, jeweils mit Abstand 1 mm gewählt. Für die Formgröße wurde bei Kreisen der Durchmesser angegeben, bei Dreiecken und Quadraten die Seitenlänge.

Alle Testplatten bestanden aus dem gleichen Silikon, aus welchem die DEA gefertigt werden.

Die Formen wurden jeweils von der kleinsten zur größten angeordnet. Die Dreiecke waren so angeordnet, dass die Probanden beim Überstreichen als Erstes auf eine der Kanten, nicht auf die Spitze, trafen.

Die Zeichnung in Abbildung 3-1 (links) soll das Layout der Platte verdeutlichen. Abbildung 3-1 (rechts) zeigt beispielhaft eine der Versuchsplatten.

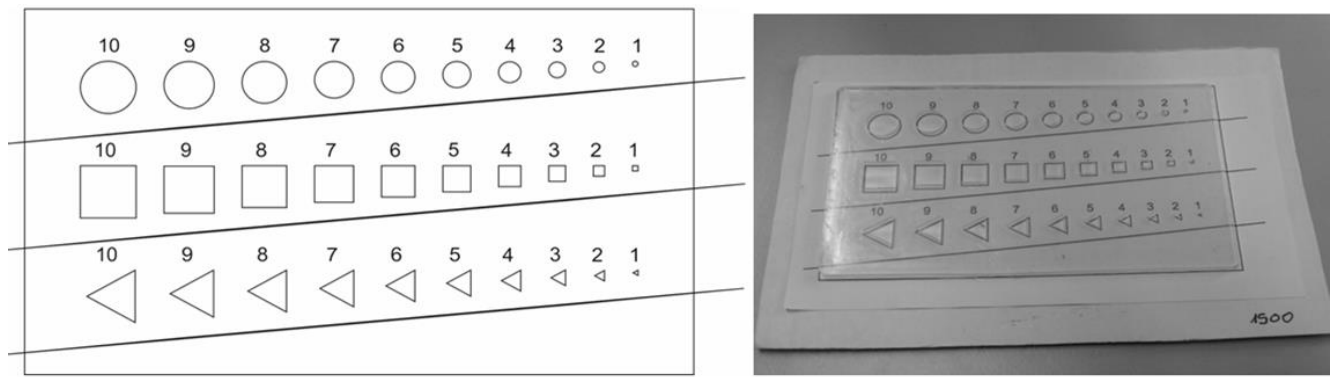


Abbildung 3-1: Schematische Zeichnung (links) und Bild (rechts) einer in Studie 1 verwendeten Versuchsplatte

### 3.3.3. Versuchsaufbau der Studie 1

Die Versuche fanden größtenteils im Labor am Institut für Arbeitswissenschaft statt. Sofern es den Probanden nicht möglich war, dort zu erscheinen wurde der Test bei ihnen zu Hause durchgeführt.

Zwischen dem Probanden und der Testplatte wurde eine Barriere platziert, damit der Proband die Testplatte selbst nicht sehen konnte.

Die Versuchsplatten wurden so angeordnet, dass der Proband den Ellenbogen auf dem Tisch aufgelegt hatte und das Handgelenk nicht abgewinkelt war.

### 3.3.4. Versuchsablauf der Studie 1

Die Probanden erhielten zu Beginn eine schriftliche Einleitung zum Versuchsablauf. Im Anschluss füllten die Probanden einen Fragebogen zur Person aus. Hierbei wurden die demografischen Daten der Probanden erfasst (Alter, Geschlecht etc.).

Alle Probanden verwendeten zum Test den Zeigefinger der dominanten Hand, d. h., Rechtshänder verwendeten den rechten Zeigefinger, Linkshänder den linken Zeigefinger. Der Finger sollte hierbei flach, mit wenig Druck aufgelegt werden.

Der Versuchsleiter legte dem Probanden die jeweilige Versuchsreihe mit der Referenzlinie zurecht und führte im Anschluss den Finger des Probanden zum Startpunkt, welcher sich am Plattenrand auf Höhe der abzutastenden Reihe befand.

Die Probanden wurden gebeten, erst anzugeben, dass sie etwas ertastet hatten, wenn sie sich ganz sicher sind. Gleiches galt für die Erkennung der Form. Der Proband begann im Anschluss die Reihe von links nach rechts abzutasten, von der kleinsten bis zur größten Form. Sobald er sich sicher war etwas wahrgenommen zu haben, teilte er dies dem Versuchsleiter mit, welche die entsprechende Formgröße notierte. Im Anschluss tastete der Probanden die Reihe weiter ab bis er sich sicher war auch die Form zu erkennen. Dies teilte er wiederum dem

---

Versuchsleiter mit, welcher die Formgröße bei Formerkennung notierte. Sofern der Proband die Form vor Erreichung der 10 mm großen Form erkannte wurden die restlichen Formen der Reihe nicht weiter abgetastet. Jeder Formreihen wurde von jedem der Probanden einmal in jeder Tiefe abgetastet. Die Versuche dauerten je nach Proband zwischen 30 min und 50 min.

### **3.3.5. Ergebnisse der Studie 1**

Jede der Formreihen wurde von jedem Probanden einmal bei jeder Tiefe abgetastet. Dies bedeutet bei 31 Probanden, dass eine Wahrnehmung beispielsweise eines Kreises bei 0,1 mm Formtiefe durch einen Probanden einen Anstieg der Anzahl wahrgenommener Formen um rund 3%. Da jede Formreihe je Tiefe einmal von jedem Probanden abetastet wurde sind die Anzahl wahrgenommener Formen und die Anzahl der Probanden welche die Formen wahrgenommen haben identisch.

#### **Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe**

Für Kreise zeigt sich insgesamt, dass eine Wahrnehmung der Form bereits ab 0,1 mm Formtiefe und 8 mm von allen Probanden erfolgte (siehe Tabelle 3-2). Trotz Schwankungen ist zu erkennen, dass mit zunehmender Formtiefe geringere Formgrößen notwendig sind, um eine Wahrnehmung der Form von allen Probanden zu erreichen. Ab 1 mm Formtiefe werden die Kreise, mit Ausnahme der 1,75 mm tiefen Formen, bereits bei 3 mm Formgröße von allen Probanden wahrgenommen.

Tabelle 3-2: Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	5	16%	16%	4	13%	13%	6	19%	19%	8	26%	26%
2	8	26%	42%	13	42%	55%	12	39%	58%	12	39%	65%
3	10	32%	74%	12	39%	94%	11	35%	94%	11	35%	100%
4	6	19%	94%	2	6%	100%	0	0%	94%	-	-	-
5	1	3%	97%	-	-	-	1	3%	97%	-	-	-
6	0	0%	97%	-	-	-	1	3%	100%	-	-	-
7	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1	3%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	13	42%	42%	12	39%	39%	12	39%	39%	11	35%	35%
2	13	42%	84%	11	35%	74%	11	35%	74%	17	55%	90%
3	3	10%	94%	6	19%	94%	6	19%	94%	3	10%	100%
4	1	3%	97%	1	3%	97%	2	6%	100%	-	-	-
5	1	3%	100%	1	3%	100%	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	13	42%	42%	15	48%	48%	14	45%	45%	14	45%	45%
2	17	55%	97%	11	35%	84%	13	42%	87%	13	42%	87%
3	1	3%	100%	5	16%	100%	2	6%	94%	4	13%	100%
4	-	-	-	-	-	-	2	6%	100%	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-3 zeigt, dass die Quadrate bereits bei 0,2 mm Formtiefe und 4 mm Formgröße von allen Probanden wahrgenommen werden. Ab 0,6 mm Formtiefe werden die Quadrate bereits für alle Formtiefen bei 3 mm Formgröße von allen Probanden wahrgenommen.

Tabelle 3-3: Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	7	23%	23%	3	10%	10%	6	19%	19%	16	52%	52%
2	8	26%	48%	17	55%	65%	21	68%	87%	10	32%	84%
3	7	23%	71%	7	23%	87%	3	10%	97%	4	13%	97%
4	5	16%	87%	4	13%	100%	0	0%	97%	1	3%	100%
5	3	10%	97%	-	-	-	1	3%	100%	-	-	-
6	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	11	35%	35%	12	39%	39%	14	45%	45%	16	52%	52%
2	11	35%	71%	17	55%	94%	14	45%	90%	13	42%	94%
3	7	23%	94%	2	6%	100%	3	10%	100%	2	6%	100%
4	2	6%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	16	52%	52%	16	52%	52%	18	58%	58%	14	45%	45%
2	11	35%	87%	13	42%	94%	11	35%	94%	16	52%	97%
3	4	13%	100%	2	6%	100%	2	6%	100%	1	3%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

In Tabelle 3-4 sind die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Dreiecke dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einer Formtiefe von 0,1 mm die Dreiecke bei 9 mm Formgröße bereits von allen Probanden wahrgenommen werden. Mit zunehmender Formtiefe zeigt sich, trotz einiger Schwankungen, dass tendenziell geringer Formgrößen benötigt werden, um eine Wahrnehmung der Form von allen Probanden zu erreichen. Vergleicht man die Ergebnisse insgesamt mit denen der Wahrnehmung bei Kreisen und Quadraten, so sind insgesamt deutlich größere Schwankungen zu erkennen, auch wenn der Trend identisch ist.



Tabelle 3-4: Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	6%	6%	3	10%	10%	5	16%	16%	11	35%	35%
2	9	29%	35%	15	48%	58%	17	55%	71%	12	39%	74%
3	8	26%	61%	3	10%	68%	6	19%	90%	3	10%	84%
4	4	13%	74%	6	19%	87%	2	6%	97%	3	10%	94%
5	7	23%	97%	1	3%	90%	0	0%	97%	1	3%	97%
6	0	0%	97%	1	3%	94%	1	3%	100%	1	3%	100%
7	0	0%	97%	2	6%	100%	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	97%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1	3%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	12	39%	39%	10	32%	32%	10	32%	32%	9	29%	29%
2	10	32%	71%	11	35%	68%	14	45%	77%	15	48%	77%
3	5	16%	87%	6	19%	87%	5	16%	94%	5	16%	94%
4	4	13%	100%	3	10%	97%	1	3%	97%	1	3%	97%
5	-	-	-	1	3%	100%	0	0%	97%	1	3%	100%
6	-	-	-	-	-	-	1	3%	100%	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	13	42%	42%	8	26%	26%	16	52%	52%	16	52%	52%
2	11	35%	77%	17	55%	81%	11	35%	87%	10	32%	84%
3	5	16%	94%	4	13%	94%	2	6%	94%	4	13%	97%
4	2	6%	100%	1	3%	97%	2	6%	100%	0	0%	97%
5	-	-	-	0	0%	97%	-	-	-	0	0%	97%
6	-	-	-	1	3%	100%	-	-	-	0	0%	97%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3%	100%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt nach Alter

In diesem Unterkapitel wird auf die wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar für die untersuchten Altersgruppen <40 Jahre und  $\geq 40$  Jahre. Die Altersgruppen an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.1.1 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Altersgruppen gegenübergestellt werden.

In Tabelle 3-5 sind die Ergebnisse für die Formwahrnehmung der Kreise für die Probanden unter 40 Jahre aufgeführt. Bei 0,1 mm Formtiefe und 8 mm Formgröße werden bereits von allen Probanden die Kreise wahrge-

nommen. Ab 1 mm Formgröße werden 3 mm Formgröße benötigt, damit die Kreise von allen Probanden wahrgenommen werden können.

Tabelle 3-5: Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	3	14%	14%	4	18%	18%	5	23%	23%	6	27%	27%
2	6	27%	41%	10	45%	64%	9	41%	64%	8	36%	64%
3	9	41%	82%	7	32%	95%	7	32%	95%	8	36%	100%
4	2	9%	91%	1	5%	100%	0	0%	95%	-	-	-
5	1	5%	95%	-	-	-	0	0%	95%	-	-	-
6	0	0%	95%	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-
7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	10	45%	45%	10	45%	45%	8	36%	36%	10	45%	45%
2	8	36%	82%	7	32%	77%	9	41%	77%	10	45%	91%
3	3	14%	95%	4	18%	95%	3	14%	91%	2	9%	100%
4	1	5%	100%	0	0%	95%	2	9%	100%	-	-	-
5	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	11	50%	50%	12	55%	55%	11	50%	50%	11	50%	50%
2	10	45%	95%	7	32%	86%	9	41%	91%	9	41%	91%
3	1	5%	100%	3	14%	100%	2	9%	100%	2	9%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Betrachtet man die Anzahl der unter 40 Jahre alten Probanden, welche die Quadrate wahrgenommen haben, so fällt auch, dass bei 0,1 mm Formtiefe maximal 95% der Formen wahrgenommen werden (vergleiche Tabelle 3-6). Bei 0,2 mm Formtiefe werden jedoch bereits bei 4 mm Formgröße die Quadrate von allen Probanden wahrgenommen. Die benötigte Formgröße, um 100% der Formen wahrzunehmen sinkt für die unter 40 Jahre alten Probanden bei 0,3 mm Formgröße auf 3 mm und bleibt bis 1,5 mm Formtiefe konstant. Bei weiterer

Steigerung der Formtiefe werden nur noch 2 mm Formgröße benötigt, damit alle der unter 40-jährigen Probanden die Quadrate wahrnehmen.

Tabelle 3-6: Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	5	23%	23%	2	9%	9%	4	18%	18%	12	55%	55%
2	8	36%	59%	15	68%	77%	17	77%	95%	9	41%	95%
3	2	9%	68%	2	9%	86%	1	5%	100%	1	5%	100%
4	4	18%	86%	3	14%	100%	-	-	-	-	-	-
5	2	9%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	8	36%	36%	8	36%	36%	11	50%	50%	13	59%	59%
2	9	41%	77%	12	55%	91%	9	41%	91%	7	32%	91%
3	5	23%	100%	2	9%	100%	2	9%	100%	2	9%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	13	59%	59%	14	64%	64%	14	64%	64%	11	50%	50%
2	6	27%	86%	6	27%	91%	8	36%	100%	11	50%	100%
3	3	14%	100%	2	9%	100%	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse der Formwahrnehmung für Dreiecke bei den unter 40 Jahre alten Probanden sind in Tabelle 3-7 dargestellt. Bei einer Formtiefe von 0,1 mm werden 9 mm Formgröße benötigt, damit alle Probanden die Dreiecke wahrnehmen können. Insgesamt zeigt sich, trotz Schwankungen, dass mit zunehmender Formtiefe die Formgröße sinkt, ab welcher alle Probanden unter 40 Jahre die Dreiecke wahrnehmen können. Die minimale Formgröße, bei welcher alle der Probanden die Dreiecke wahrnehmen, wird mit 3 mm bei 1,5 mm Formtiefe erreicht.

Tabelle 3-7: Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &lt;40 Jahre (N=22)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	1	5%	5%	2	9%	9%	3	14%	14%	10	45%	45%
2	7	32%	36%	12	55%	64%	15	68%	82%	9	41%	86%
3	7	32%	68%	2	9%	73%	3	14%	95%	1	5%	91%
4	3	14%	82%	4	18%	91%	1	5%	100%	1	5%	95%
5	3	14%	95%	1	5%	95%	-	-	-	1	5%	100%
6	0	0%	95%	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	8	36%	36%	6	27%	27%	8	36%	36%	6	27%	27%
2	7	32%	68%	10	45%	73%	9	41%	77%	11	50%	77%
3	5	23%	91%	5	23%	95%	4	18%	95%	4	18%	95%
4	2	9%	100%	1	5%	100%	1	5%	100%	1	5%	100%
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	11	50%	50%	7	32%	32%	12	55%	55%	13	59%	59%
2	7	32%	82%	12	55%	86%	7	32%	86%	5	23%	82%
3	3	14%	95%	3	14%	100%	1	5%	91%	3	14%	95%
4	1	5%	100%	-	-	-	2	9%	100%	0	0%	95%
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	95%
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	95%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-8 zeigt die Auswertung der Wahrnehmung der Kreise für die über 40 Jahre alten Probanden. Bei 0,1 mm Formtiefe werden die -quadrate bei 4 mm Formtiefe bereits von allen Probanden wahrgenommen. Bei 1,25 mm Formtiefe werden die Quadrate bereits bei 2 mm Formgröße von allen über 40 Jahre alten Probanden wahrgenommen. Insgesamt ist keine deutliche Abnahme der Formgröße mit zunehmender Formtiefe erkennbar, um eine Wahrnehmung von 100% zu erreichen.

Tabelle 3-8: Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	22%	22%	0	0%	0%	1	11%	11%	2	22%	22%
2	2	22%	44%	3	33%	33%	3	33%	44%	4	44%	67%
3	1	11%	56%	5	56%	89%	4	44%	89%	3	33%	100%
4	4	44%	100%	1	11%	100%	0	0%	89%	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	1	11%	100%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	3	33%	33%	2	22%	22%	4	44%	44%	1	11%	11%
2	5	56%	89%	4	44%	67%	2	22%	67%	7	78%	89%
3	0	0%	89%	2	22%	89%	3	33%	100%	1	11%	100%
4	0	0%	89%	1	11%	100%	-	-	-	-	-	-
5	1	11%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	22%	22%	3	33%	33%	3	33%	33%	3	33%	33%
2	7	78%	100%	4	44%	78%	4	44%	78%	4	44%	78%
3	-	-	-	2	22%	100%	0	0%	78%	2	22%	100%
4	-	-	-	-	-	-	2	22%	100%	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Quadrate bei über 40 Jahre alten Probanden sind in Tabelle 3-9 dargestellt. Sie benötigen bei 0,1 mm Formtiefe eine Formgröße von 5 mm, um alle Quadrate wahrzunehmen. Bei 0,6 mm Formtiefe werden 2 mm Formgröße benötigt, damit alle der über 40 Jahre alten Probanden die Quadrate wahrnehmen.

Tabelle 3-9: Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &gt; 40 Jahre (N=9)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	22%	22%	1	11%	11%	2	22%	22%	4	44%	44%
2	0	0%	22%	2	22%	33%	4	44%	67%	1	11%	56%
3	5	56%	78%	5	56%	89%	2	22%	89%	3	33%	89%
4	1	11%	89%	1	11%	100%	0	0%	89%	1	11%	100%
5	1	11%	100%	-	-	-	1	11%	100%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	3	33%	33%	4	44%	44%	3	33%	33%	3	33%	33%
2	2	22%	56%	5	56%	100%	5	56%	89%	6	67%	100%
3	2	22%	78%	-	-	-	1	11%	100%	-	-	-
4	2	22%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	3	33%	33%	2	22%	22%	4	44%	44%	3	33%	33%
2	5	56%	89%	7	78%	100%	3	33%	78%	5	56%	89%
3	1	11%	100%	-	-	-	2	22%	100%	1	11%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Dreiecke für die Probanden über 40 Jahre sind in Tabelle 3-10 dargestellt. Bei 0,1 mm Formtiefe werden die Dreiecke ab 5 mm Formgröße von allen Probanden wahrgenommen. Insgesamt sind die Ergebnisse jedoch Schwankungen unterworfen und es ist keine eindeutige Tendenz erkennbar. Mindestens waren 3 mm Formgröße nötig (bei 1,75 und 2 mm Formtiefe), damit alle Probanden die Dreiecke wahrnehmen konnten.

Tabelle 3-10: Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	1	11%	11%	1	11%	11%	2	22%	22%	1	11%	11%
2	2	22%	33%	3	33%	44%	2	22%	44%	3	33%	44%
3	1	11%	44%	1	11%	56%	3	33%	78%	2	22%	67%
4	1	11%	56%	2	22%	78%	1	11%	89%	2	22%	89%
5	4	44%	100%	0	0%	78%	0	0%	89%	0	0%	89%
6	-	-	-	0	0%	78%	1	11%	100%	1	11%	100%
7	-	-	-	2	22%	100%	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	4	44%	44%	4	44%	44%	2	22%	22%	3	33%	33%
2	3	33%	78%	1	11%	56%	5	56%	78%	4	44%	78%
3	0	0%	78%	1	11%	67%	1	11%	89%	1	11%	89%
4	2	22%	100%	2	22%	89%	0	0%	89%	0	0%	89%
5	-	-	-	1	11%	100%	0	0%	89%	1	11%	100%
6	-	-	-	-	-	-	1	11%	100%	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	22%	22%	1	11%	11%	4	44%	44%	3	33%	33%
2	4	44%	67%	5	56%	67%	4	44%	89%	5	56%	89%
3	2	22%	89%	1	11%	78%	1	11%	100%	1	11%	100%
4	1	11%	100%	1	11%	89%	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	0	0%	89%	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	1	11%	100%	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt nach Geschlecht

An dieser Stelle wird auf die wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar getrennt für beide Geschlechter. Die Ergebnisse für beide Geschlechter an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.1.2 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenüber gestellt werden.

Bei den männlichen Probanden wird bei einer Formtiefe von 0,1 mm eine Formgröße von 8 mm benötigt, damit alle Probanden die Kreise wahrnehmen (vgl. Tabelle 3-11). Insgesamt ist trotz Schwankungen zu erkennen, dass mit zunehmender Formtiefe tendenziell geringere Formgrößen benötigt werden, damit alle Probanden

die Kreise wahrnehmen können. Ab 1 mm Formtiefe liegt die benötigte Formgröße, mit Ausnahme von 1,75 mm Formtiefe, konstant bei 3 mm, damit alle männlichen Probanden die Kreise wahrnehmen können.

Tabelle 3-11: Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	3	19%	19%	0	0%	0%	1	6%	6%	2	13%	13%
2	1	6%	25%	5	31%	31%	5	31%	38%	8	50%	63%
3	6	38%	63%	10	63%	94%	9	56%	94%	6	38%	100%
4	4	25%	88%	1	6%	100%	0	0%	94%	-	-	-
5	1	6%	94%	-	-	-	0	0%	94%	-	-	-
6	0	0%	94%	-	-	-	1	6%	100%	-	-	-
7	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1	6%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	6	38%	38%	4	25%	25%	6	38%	38%	6	38%	38%
2	8	50%	88%	7	44%	69%	5	31%	69%	9	56%	94%
3	1	6%	94%	4	25%	94%	3	19%	88%	1	6%	100%
4	1	6%	100%	0	0%	94%	2	13%	100%	-	-	-
5	-	-	-	1	6%	100%	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	5	31%	31%	7	44%	44%	5	31%	31%	7	44%	44%
2	10	63%	94%	5	31%	75%	11	69%	100%	7	44%	88%
3	1	6%	100%	4	25%	100%	-	-	-	2	13%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Quadrate durch die männlichen Probanden sind in Tabelle 3-12 dargestellt. Bei 0,1 mm Formtiefe können auch bei 10 mm Formgröße nicht alle Probanden die Quadrate wahrnehmen. Bei 0,2 mm Formtiefe wird für eine Wahrnehmung der Quadrate durch alle männlichen Probanden noch eine Formgröße von 4 mm benötigt. Ab hier nimmt die benötigte Formgröße für die Wahrnehmung der Quadrate durch alle Probanden nicht mehr merklich ab. Sie schwankt leicht, ist jedoch ab 0,6 mm Formtiefe mit 3 mm konstant.



Tabelle 3-12: Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	13%	13%	2	13%	13%	2	13%	13%	8	50%	50%
2	3	19%	31%	8	50%	63%	11	69%	81%	7	44%	94%
3	3	19%	50%	4	25%	88%	3	19%	100%	1	6%	100%
4	5	31%	81%	2	13%	100%	-	-	-	-	-	-
5	2	13%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0	0%	94%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	4	25%	25%	5	31%	31%	7	44%	44%	6	38%	38%
2	7	44%	69%	9	56%	88%	7	44%	88%	8	50%	88%
3	4	25%	94%	2	13%	100%	2	13%	100%	2	13%	100%
4	1	6%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	6	38%	38%	6	38%	38%	6	38%	38%	6	38%	38%
2	7	44%	81%	8	50%	88%	9	56%	94%	9	56%	94%
3	3	19%	100%	2	13%	100%	1	6%	100%	1	6%	100%
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Betrachtet man die Dreiecke, so werden bei 0,1 mm Formtiefe 5 mm Formgröße benötigt, damit alle Dreiecke von den männlichen Probanden wahrgenommen werden können (vgl. Tabelle 3-13). Insgesamt ist ein Trend erkennbar. Mit zunehmender Formtiefe verringert sich die Formgröße die benötigt wird, damit alle männlichen Probanden die Dreiecke wahrnehmen können. Das Minimum wird mit 3 mm Formgröße bei 1,5 mm Formtiefe erreicht, danach steigt die benötigte Formgröße jedoch wieder an und erreicht bei 10 mm Formtiefe 7 mm, um eine Wahrnehmung der Dreiecke durch alle Probanden zu erreichen.

Tabelle 3-13: Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	1	6%	6%	1	6%	6%	3	19%	19%	4	25%	25%
2	4	25%	31%	8	50%	56%	8	50%	69%	6	38%	63%
3	6	38%	69%	2	13%	69%	4	25%	94%	3	19%	81%
4	3	19%	88%	3	19%	88%	1	6%	100%	2	13%	94%
5	2	13%	100%	0	0%	88%	-	-	-	1	6%	100%
6	-	-	-	1	6%	94%	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	1	6%	100%	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	5	31%	31%	2	13%	13%	3	19%	19%	4	25%	25%
2	6	38%	69%	7	44%	56%	9	56%	75%	8	50%	75%
3	3	19%	88%	5	31%	88%	3	19%	94%	3	19%	94%
4	2	13%	100%	2	13%	100%	1	6%	100%	1	6%	100%
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	7	44%	44%	3	19%	19%	6	38%	38%	7	44%	44%
2	5	31%	75%	9	56%	75%	7	44%	81%	5	31%	75%
3	2	13%	88%	4	25%	100%	1	6%	88%	3	19%	94%
4	2	13%	100%	-	-	-	2	13%	100%	0	0%	94%
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	94%
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	94%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	6%	100%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Für weibliche Probanden wird bei einer Formtiefe von 0,1 mm eine Formgröße von 4 mm benötigt, damit alle Probanden die Kreise wahrnehmen können (vgl. Tabelle 3-14). Mit zunehmender Formtiefe schwankt die benötigte Formgröße welche benötigt wird um eine Wahrnehmung der Kreise bei allen weiblichen Probanden zu erreichen. Das Minimum wird bei 1,25 mm tiefen Kreisen mit 2 mm Formgröße erreicht.

Tabelle 3-14: Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	2	13%	13%	4	27%	27%	5	33%	33%	6	40%	40%
2	7	47%	60%	8	53%	80%	7	47%	80%	4	27%	67%
3	4	27%	87%	2	13%	93%	2	13%	93%	5	33%	100%
4	2	13%	100%	1	7%	100%	0	0%	93%	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	7	47%	47%	8	53%	53%	6	40%	40%	5	33%	33%
2	5	33%	80%	4	27%	80%	6	40%	80%	8	53%	87%
3	2	13%	93%	2	13%	93%	3	20%	100%	2	13%	100%
4	0	0%	93%	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-
5	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	8	53%	53%	8	53%	53%	9	60%	60%	7	47%	47%
2	7	47%	100%	6	40%	93%	2	13%	73%	6	40%	87%
3	-	-	-	1	7%	100%	2	13%	87%	2	13%	100%
4	-	-	-	-	-	-	2	13%	100%	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Betrachtet man die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Quadrate durch die weiblichen Probanden (vgl. Tabelle 3-15), so zeigen die Ergebnisse, dass bei 0,1 mm Formtiefe 5 mm große Quadrate benötigt werden, damit diese von allen Probanden wahrgenommen werden. Insgesamt zeigt sich, dass eine Erhöhung der Formtiefe zu einer Abnahme der Formgröße führt welche benötigt wird, damit alle weiblichen Probanden die Quadrate wahrnehmen können. Das Minimum liegt bei 2 mm Formgröße und wird erstmals bei 0,6 mm Formtiefe erreicht.

Tabelle 3-15 Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	5	33%	33%	1	7%	7%	4	27%	27%	8	53%	53%
2	5	33%	67%	9	60%	67%	10	67%	93%	3	20%	73%
3	4	27%	93%	3	20%	87%	0	0%	93%	3	20%	93%
4	0	0%	93%	2	13%	100%	0	0%	93%	1	7%	100%
5	1	7%	100%	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	7	47%	47%	7	47%	47%	7	47%	47%	10	67%	67%
2	4	27%	73%	8	53%	100%	7	47%	93%	5	33%	100%
3	3	20%	93%	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-
4	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	10	67%	67%	10	67%	67%	12	80%	80%	8	53%	53%
2	4	27%	93%	5	33%	100%	2	13%	93%	7	47%	100%
3	1	7%	100%	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Dreiecke für die weiblichen Probanden sind in Tabelle 3-16 dargestellt. Bei 0,1 mm Formtiefe werden 9 mm Formgröße benötigt, damit alle weiblichen Probanden die Dreiecke wahrnehmen können. Insgesamt sind die Ergebnisse schwankend, eine Abnahme der benötigten Formgröße mit zunehmender Formtiefe ist jedoch erkennbar. Das Minimum der benötigten Formgröße liegt bei Dreiecken bei 3 mm, um eine Wahrnehmung bei allen Probanden zu erreichen. Erstmals wird dieses bei 1,25 mm erreicht.

Tabelle 3-16: Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	1	7%	7%	2	13%	13%	2	13%	13%	7	47%	47%
2	5	33%	40%	7	47%	60%	9	60%	73%	6	40%	87%
3	2	13%	53%	1	7%	67%	2	13%	87%	0	0%	87%
4	1	7%	60%	3	20%	87%	1	7%	93%	1	7%	93%
5	5	33%	93%	1	7%	93%	0	0%	93%	0	0%	93%
6	0	0%	93%	0	0%	93%	1	7%	100%	1	7%	100%
7	0	0%	93%	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-
8	0	0%	93%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	7	47%	47%	8	53%	53%	7	47%	47%	5	33%	33%
2	4	27%	73%	4	27%	80%	5	33%	80%	7	47%	80%
3	2	13%	87%	1	7%	87%	2	13%	93%	2	13%	93%
4	2	13%	100%	1	7%	93%	0	0%	93%	0	0%	93%
5	-	-	-	1	7%	100%	0	0%	93%	1	7%	100%
6	-	-	-	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	6	40%	40%	5	33%	33%	10	67%	67%	9	60%	60%
2	6	40%	80%	8	53%	87%	4	27%	93%	5	33%	93%
3	3	20%	100%	0	0%	87%	1	7%	100%	1	7%	100%
4	-	-	-	1	7%	93%	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	0	0%	93%	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	1	7%	100%	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe

Im Anschluss erfolgte die Untersuchung der Formerkennung in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe. Die Ergebnisse für die Erkennung der Kreise sind in Tabelle 3-17 dargestellt. Insgesamt wird deutlich, dass eine Formerkennung bei Formgrößen bis 10 mm und Formtiefen bis 2 mm nicht bei allen Probanden möglich ist. Jedoch kann die Anzahl der Probanden, welche die Formen erkannt haben, bei Steigerung der Formtiefe von 0,1 mm auf 0,2 mm bereits von 45% auf 81% gesteigert werden. Trotz leichter Schwankungen werden im Bereich 0,5 mm bis 1,75 mm Formtiefe die Kreise maximal von 90% Probanden erkannt, bei 2 mm Formgröße wird das Maximum von 97% erreicht. Ab 0,8 mm Formtiefe wird deutlich, dass eine Steigerung der Formgröße

über 7 mm (außer bei 1,5 mm und 2,0mm tiefen Formen) nicht dazu führt, dass mehr der Probanden die Formen erkennen. Es fällt außerdem auf, dass eine Formerkennung erst ab 2 mm, in den meisten Fällen sogar erst ab 3 mm Formgröße möglich ist.

Tabelle 3-17: Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	3%	3%	2	6%	6%	0	0%	0%	1	3%	3%
3	1	3%	6%	4	13%	19%	5	16%	16%	2	6%	10%
4	0	0%	6%	3	10%	29%	7	23%	39%	2	6%	16%
5	1	3%	10%	3	10%	39%	2	6%	45%	7	23%	39%
6	3	10%	19%	5	16%	55%	7	23%	68%	8	26%	65%
7	3	10%	29%	5	16%	71%	3	10%	77%	4	13%	77%
8	2	6%	35%	2	6%	77%	2	6%	84%	2	6%	84%
9	2	6%	42%	1	3%	81%	0	0%	84%	1	3%	87%
10	1	3%	45%	-	0%	81%	1	3%	87%	0	0%	87%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	3%	3%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	3%	6%	2	6%	6%	3	10%	10%	6	19%	19%
4	7	23%	29%	6	19%	26%	6	19%	29%	2	6%	26%
5	8	26%	55%	8	26%	52%	7	23%	52%	7	23%	48%
6	6	19%	74%	5	16%	68%	6	19%	71%	8	26%	74%
7	4	13%	87%	3	10%	77%	5	16%	87%	5	16%	90%
8	1	3%	90%	4	13%	90%	0	0%	87%	0	0%	90%
9	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	87%	0	0%	90%
10	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	87%	0	0%	90%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	1	3%	3%	1	3%	3%
3	3	10%	10%	3	10%	10%	2	6%	10%	1	3%	6%
4	5	16%	26%	5	16%	26%	6	19%	29%	6	19%	26%
5	10	32%	58%	11	35%	61%	10	32%	61%	7	23%	48%
6	7	23%	81%	6	19%	81%	5	16%	77%	9	29%	77%
7	3	10%	90%	2	6%	87%	4	13%	90%	5	16%	94%
8	0	0%	90%	1	3%	90%	0	0%	90%	1	3%	97%
9	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	97%
10	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	90%	0	0%	97%

Die Ergebnisse der Auswertung der Formerkennung für die Quadrate sind in Tabelle 3-18 dargestellt. Bei 0,1 mm Formtiefe können maximal 29% der Probanden die Quadrate erkennen. Durch Steigerung der Formtiefe kann insgesamt die Anzahl der Probanden welche die Form erkannt haben zwar gesteigert werden, erreicht jedoch maximal 81%. Dies ist bei 1,25 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße der Fall. Insgesamt schwanken die

Ergebnisse und es ist kein deutlicher Trend feststellbar. Bei den meisten Formtiefen erfolgt eine Formerkennung erst ab 3 mm Formgröße.

Tabelle 3-18: Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	1	3%	3%	2	6%	6%	0	0%	0%
3	1	3%	3%	1	3%	6%	1	3%	10%	3	10%	10%
4	2	6%	10%	4	13%	19%	7	23%	32%	4	13%	23%
5	1	3%	13%	3	10%	29%	4	13%	45%	5	16%	39%
6	2	6%	19%	2	6%	35%	4	13%	58%	4	13%	52%
7	0	0%	19%	4	13%	48%	3	10%	68%	1	3%	55%
8	1	3%	23%	1	3%	52%	1	3%	71%	2	6%	61%
9	2	6%	29%	1	3%	55%	0	0%	71%	2	6%	68%
10	0	0%	29%	1	3%	58%	0	0%	71%	0	0%	68%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	2	6%	6%	0	0%	0%	5	16%	16%
4	7	23%	23%	3	10%	16%	4	13%	13%	2	6%	23%
5	4	13%	35%	2	6%	23%	5	16%	29%	4	13%	35%
6	5	16%	52%	4	13%	35%	5	16%	45%	3	10%	45%
7	6	19%	71%	5	16%	52%	5	16%	61%	5	16%	61%
8	0	0%	71%	2	6%	58%	0	0%	61%	3	10%	71%
9	1	3%	74%	0	0%	58%	1	3%	65%	0	0%	71%
10	0	0%	74%	0	0%	58%	0	0%	65%	0	0%	71%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	1	3%	3%
3	3	10%	10%	1	3%	3%	2	6%	6%	1	3%	6%
4	3	10%	19%	3	10%	13%	3	10%	16%	4	13%	19%
5	3	10%	29%	6	19%	32%	5	16%	32%	4	13%	32%
6	8	26%	55%	6	19%	52%	5	16%	48%	5	16%	48%
7	4	13%	68%	3	10%	61%	2	6%	55%	6	19%	68%
8	1	3%	71%	2	6%	68%	0	0%	55%	1	3%	71%
9	2	6%	77%	1	3%	71%	1	3%	58%	0	0%	71%
10	1	3%	81%	0	0%	71%	0	0%	58%	0	0%	71%

Auch bei den Dreiecken kommt es bei den meisten Formtiefen erst ab 3 mm Formgröße zu einer Erkennung der Form (vgl. Tabelle 3-19). Die Anzahl der Probanden, welche die Dreiecke erkennen, kann mit einer Steigerung der Formtiefe von 0,1 mm auf 0,2 von 26% auf 77% gesteigert werden. Bei 0,6 mm und 1,5 mm Formtiefe wurden sogar von allen Probanden die Dreiecke erkannt. Insgesamt liegt die Anzahl der Probanden, welche die Dreiecke erkannt haben, ab 0,6 mm Formgröße immer über 90%.

Tabelle 3-19: Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	3%	3%	0	0%	0%	2	6%	6%	3	10%	10%
4	1	3%	6%	2	6%	6%	4	13%	19%	2	6%	16%
5	1	3%	10%	4	13%	19%	6	19%	39%	9	29%	45%
6	1	3%	13%	7	23%	42%	6	19%	58%	5	16%	61%
7	1	3%	16%	7	23%	65%	4	13%	71%	7	23%	84%
8	1	3%	19%	1	3%	68%	5	16%	87%	3	10%	94%
9	1	3%	23%	0	0%	68%	0	0%	87%	1	3%	97%
10	1	3%	26%	3	10%	77%	1	3%	90%	0	0%	97%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	3%	3%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	3	10%	13%	0	0%	0%	4	13%	13%	1	3%	3%
4	3	10%	23%	5	16%	16%	4	13%	26%	5	16%	19%
5	5	16%	39%	9	29%	45%	5	16%	42%	3	10%	29%
6	8	26%	65%	4	13%	58%	4	13%	55%	10	32%	61%
7	2	6%	71%	8	26%	84%	6	19%	74%	4	13%	74%
8	4	13%	84%	3	10%	94%	3	10%	84%	5	16%	90%
9	0	0%	84%	1	3%	97%	2	6%	90%	1	3%	94%
10	1	3%	87%	1	3%	100%	1	3%	94%	0	0%	94%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	2	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	3%	3%	0	0%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	5	16%	19%	4	13%	19%	7	23%	23%	5	16%	16%
5	7	23%	42%	7	23%	42%	5	16%	39%	8	26%	42%
6	4	13%	55%	9	29%	71%	8	26%	65%	7	23%	65%
7	4	13%	68%	5	16%	87%	5	16%	81%	4	13%	77%
8	6	19%	87%	1	3%	90%	2	6%	87%	2	6%	84%
9	3	10%	97%	3	10%	100%	2	6%	94%	2	6%	90%
10	0	0%	97%	0	0%	100%	1	3%	97%	1	3%	94%

### Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt nach Alter

In diesem Unterkapitel wird auf die erkannten Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar getrennt für die untersuchten Altersgruppen <40 Jahre und  $\geq 40$  Jahre. Die Altersgruppen an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.1.3 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Altersgruppen gegenübergestellt werden.

Die Auswertung der Erkennung der Kreise durch die Probanden unter 40 Jahre ist in Tabelle 3-20 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass nur gut die Hälfte aller Probanden die Kreise bei 0,1 mm Formtiefe richtig erkennen. Bei 0,2 mm steigt diese Zahl jedoch bereits auf 82%. Ab 0,5 mm Formtiefe können, mit Ausnahme von



1,25 mm Formtiefe, immer mehr als 90% der Probanden unter 40 Jahre die Kreise erkennen. Die Anzahl der Probanden welche die Kreise erkennen steigt hierbei immer bis zu Formgrößen von 7 mm oder 8 mm an. Bei weiter Steigerung der Formgröße kann die Anzahl der Probanden, welche die Kreise erkennen, nicht weiter gesteigert werden.

Tabelle 3-20: Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	5%	5%	2	9%	9%	0	0%	0%	1	5%	5%
3	1	5%	9%	2	9%	18%	3	14%	14%	1	5%	9%
4	0	0%	9%	3	14%	32%	4	18%	32%	2	9%	18%
5	1	5%	14%	3	14%	45%	2	9%	41%	3	14%	32%
6	2	9%	23%	3	14%	59%	5	23%	64%	6	27%	59%
7	3	14%	36%	2	9%	68%	2	9%	73%	3	14%	73%
8	2	9%	45%	2	9%	77%	1	5%	77%	2	9%	82%
9	2	9%	55%	1	5%	82%	0	0%	77%	0	0%	82%
10	0	0%	55%	0	0%	82%	1	5%	82%	0	0%	82%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	5%	5%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	5%	9%	2	9%	9%	2	9%	9%	5	23%	23%
4	6	27%	36%	6	27%	36%	5	23%	32%	1	5%	27%
5	6	27%	64%	5	23%	59%	6	27%	59%	6	27%	55%
6	4	18%	82%	3	14%	73%	5	23%	82%	4	18%	73%
7	2	9%	91%	3	14%	86%	4	18%	100%	4	18%	91%
8	0	0%	91%	1	5%	91%	-	-	-	0	0%	91%
9	0	0%	91%	0	0%	91%	-	-	-	0	0%	91%
10	0	0%	91%	0	0%	91%	-	-	-	0	0%	91%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%	1	5%	5%
3	2	9%	9%	3	14%	14%	2	9%	14%	1	5%	9%
4	3	14%	23%	5	23%	36%	3	14%	27%	6	27%	36%
5	8	36%	59%	9	41%	77%	10	45%	73%	5	23%	59%
6	4	18%	77%	4	18%	95%	4	18%	91%	5	23%	82%
7	2	9%	86%	0	0%	95%	1	5%	95%	2	9%	91%
8	0	0%	86%	0	0%	95%	0	0%	95%	1	5%	95%
9	0	0%	86%	0	0%	95%	0	0%	95%	0	0%	95%
10	0	0%	86%	0	0%	95%	0	0%	95%	0	0%	95%

Tabelle 3-21 zeigt die Ergebnisse für die Auswertung der erkannten Quadrate der Probanden unter 40 Jahre. Bei 0,1 mm Formtiefe werden in diesem Fall die Formen von maximal 41% der Probanden wahrgenommen. Insgesamt schwanken die Werte mit zunehmender Formtiefe. Das Maximum wird bei einer Formtiefe von 1,25 mm erreicht. Hier erkennen 86% der Probanden bis 40 Jahre die Quadrate. Bei den meisten Formtiefen bringt

eine Erhöhung der Formgröße über 8 mm hinaus keine Erhöhung der Anzahl Proband welche die Quadrate als solche erkannt haben mehr mit sich.

Tabelle 3-21: Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und -tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	1	5%	5%	2	9%	9%	0	0%	0%
3	1	5%	5%	1	5%	9%	1	5%	14%	3	14%	14%
4	2	9%	14%	4	18%	27%	5	23%	36%	3	14%	27%
5	1	5%	18%	3	14%	41%	4	18%	55%	5	23%	50%
6	2	9%	27%	0	0%	41%	3	14%	68%	2	9%	59%
7	0	0%	27%	4	18%	59%	1	5%	73%	0	0%	59%
8	1	5%	32%	1	5%	64%	0	0%	73%	2	9%	68%
9	2	9%	41%	0	0%	64%	0	0%	73%	1	5%	73%
10	0	0%	41%	0	0%	64%	0	0%	73%	0	0%	73%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	1	5%	5%	0	0%	0%	4	18%	18%
4	5	23%	23%	3	14%	18%	4	18%	18%	2	9%	27%
5	3	14%	36%	2	9%	27%	4	18%	36%	3	14%	41%
6	2	9%	45%	3	14%	41%	2	9%	45%	2	9%	50%
7	5	23%	68%	2	9%	50%	2	9%	55%	4	18%	68%
8	0	0%	68%	2	9%	59%	0	0%	55%	1	5%	73%
9	1	5%	73%	0	0%	59%	0	0%	55%	0	0%	73%
10	0	0%	73%	0	0%	59%	0	0%	55%	0	0%	73%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
3	3	14%	14%	1	5%	5%	2	9%	9%	1	5%	9%
4	3	14%	27%	3	14%	18%	2	9%	18%	3	14%	23%
5	3	14%	41%	5	23%	41%	4	18%	36%	4	18%	41%
6	5	23%	64%	4	18%	59%	4	18%	55%	4	18%	59%
7	3	14%	77%	1	5%	64%	0	0%	55%	3	14%	73%
8	1	5%	82%	0	0%	64%	0	0%	55%	0	0%	73%
9	0	0%	82%	0	0%	64%	0	0%	55%	0	0%	73%
10	1	5%	86%	0	0%	64%	0	0%	55%	0	0%	73%

Die Auswertung der Anzahl der Probanden unter 40 Jahre welche die Dreiecke als solche erkannten ist in Tabelle 3-22 dargestellt. Mit Steigerung der Formtiefe der Formtiefe von 0,1 auf 0,2 mm wird eine deutliche Steigerung der Anzahl an Probanden erreicht welche die Dreiecke als solche erkennen. Sie steigt von 32% bei 0,1 mm auf 82% bei 0,2 mm Formtiefe. Bei den Formtiefen 0,6 mm, 0,8 mm und 1,5 mm werden die Dreiecke von allen Probanden unter 40 Jahre erkannt. Bei den meisten Formtiefen ist den Probanden eine Erkennung der Form bei Formgrößen unter 3 mm bzw. 4 mm jedoch nicht möglich.

Tabelle 3-22: Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &lt;40 Jahre (N=22)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	2	9%	9%	3	14%	14%
4	1	5%	5%	2	9%	9%	4	18%	27%	2	9%	23%
5	1	5%	9%	4	18%	27%	5	23%	50%	8	36%	59%
6	1	5%	14%	6	27%	55%	5	23%	73%	3	14%	73%
7	1	5%	18%	5	23%	77%	2	9%	82%	4	18%	91%
8	1	5%	23%	0	0%	77%	2	9%	91%	1	5%	95%
9	1	5%	27%	0	0%	77%	0	0%	91%	0	0%	95%
10	1	5%	32%	1	5%	82%	1	5%	95%	0	0%	95%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	5%	5%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	3	14%	18%	0	0%	0%	3	14%	14%	1	5%	5%
4	2	9%	27%	5	23%	23%	4	18%	32%	5	23%	27%
5	5	23%	50%	6	27%	50%	5	23%	55%	3	14%	41%
6	4	18%	68%	3	14%	64%	3	14%	68%	6	27%	68%
7	1	5%	73%	6	27%	91%	4	18%	86%	3	14%	82%
8	2	9%	82%	2	9%	100%	2	9%	95%	2	9%	91%
9	0	0%	82%	-	-	-	0	0%	95%	0	0%	91%
10	0	0%	82%	-	-	-	1	5%	100%	0	0%	91%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	2	9%	9%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	5%	5%	0	0%	9%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	5	23%	27%	3	14%	23%	7	32%	32%	4	18%	18%
5	6	27%	55%	5	23%	45%	4	18%	50%	6	27%	45%
6	4	18%	73%	8	36%	82%	6	27%	77%	6	27%	73%
7	2	9%	82%	2	9%	91%	2	9%	86%	3	14%	86%
8	3	14%	95%	1	5%	95%	2	9%	95%	0	0%	86%
9	0	0%	95%	1	5%	100%	0	0%	95%	1	5%	91%
10	0	0%	95%	-	-	-	0	0%	95%	0	0%	91%

Die Ergebnisse der Auswertung der erkannten Kreise für die Probanden im Alter über 40 Jahre können Tabelle 3-23 entnommen werden. Es fällt auf, dass nur 11% der Probanden dieser Altersgruppen die Kreise bei 0,1 mm Formtiefe erkennen. Jedoch erkennen die Probanden über 40 Jahre bereits bei 0,3 mm Formtiefe und 8 mm Formgröße alle Kreise. Bei weiterer Steigerung der Formtiefe sind die Werte schwankend und kein klarer Trend ist erkennbar. Unterhalb von 3 mm Formgröße können die Probanden bei keiner der Formtiefen die Kreise als solche erkennen. Bei den meisten Formtiefen bringt eine Steigerung der Formgröße über 7 mm keine Erhöhung der Anzahl an Probanden mit sich, welche die Kreise erkennen.

Tabelle 3-23: Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &gt; 40 Jahre (N=9)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	2	22%	22%	2	22%	22%	1	11%	11%
4	0	0%	0%	0	0%	22%	3	33%	56%	0	0%	11%
5	0	0%	0%	0	0%	22%	0	0%	56%	4	44%	56%
6	1	11%	11%	2	22%	44%	2	22%	78%	2	22%	78%
7	0	0%	11%	3	33%	78%	1	11%	89%	1	11%	89%
8	0	0%	11%	0	0%	78%	1	11%	100%	0	0%	89%
9	0	0%	11%	0	0%	78%	-	-	-	1	11%	100%
10	0	0%	11%	0	0%	78%	-	-	-	-	-	-
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	11%	11%	1	11%	11%
4	1	11%	11%	0	0%	0%	1	11%	22%	1	11%	22%
5	2	22%	33%	3	33%	33%	1	11%	33%	1	11%	33%
6	2	22%	56%	2	22%	56%	1	11%	44%	4	44%	78%
7	2	22%	78%	0	0%	56%	1	11%	56%	1	11%	89%
8	1	11%	89%	3	33%	89%	0	0%	56%	0	0%	89%
9	0	0%	89%	0	0%	89%	0	0%	56%	0	0%	89%
10	0	0%	89%	0	0%	89%	0	0%	56%	0	0%	89%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	11%	11%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	2	22%	33%	0	0%	0%	3	33%	33%	0	0%	0%
5	2	22%	56%	2	22%	22%	0	0%	33%	2	22%	22%
6	3	33%	89%	2	22%	44%	1	11%	44%	4	44%	67%
7	1	11%	100%	2	22%	67%	3	33%	78%	3	33%	100%
8	-	-	-	1	11%	78%	0	0%	78%	-	-	-
9	-	-	-	0	0%	78%	0	0%	78%	-	-	-
10	-	-	-	0	0%	78%	0	0%	78%	-	-	-

Bei den Quadraten kann keiner der über 40 Jahre alten Probanden diese bei 0,1 mm Formtiefe als solche erkennen (vgl. Tabelle 3-24). Bis 0,3 mm Formtiefe steigt die Anzahl der Probanden welche die Quadrate als solche erkennen auf 67% und schwankt dann mit zunehmender Formtiefe. Das Maximum an Probanden der Altersgruppe über 40 Jahre welche die Quadrate erkennen wird mit 89% bei 0,8 und 1,5 mm Formtiefe erreicht.

Tabelle 3-24: Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &gt; 40 Jahre (N=9)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	0	0%	0%	0	0%	0%	2	22%	22%	1	11%	11%
5	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	22%	0	0%	11%
6	0	0%	0%	2	22%	22%	1	11%	33%	2	22%	33%
7	0	0%	0%	0	0%	22%	2	22%	56%	1	11%	44%
8	0	0%	0%	0	0%	22%	1	11%	67%	0	0%	44%
9	0	0%	0%	1	11%	33%	0	0%	67%	1	11%	56%
10	0	0%	0%	0	0%	33%	0	0%	67%	0	0%	56%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	1	11%	11%	0	0%	0%	1	11%	11%
4	2	22%	22%	0	0%	11%	0	0%	0%	0	0%	11%
5	1	11%	33%	0	0%	11%	1	11%	11%	1	11%	22%
6	3	33%	67%	1	11%	22%	3	33%	44%	1	11%	33%
7	1	11%	78%	3	33%	56%	3	33%	78%	1	11%	44%
8	0	0%	78%	0	0%	56%	0	0%	78%	2	22%	67%
9	0	0%	78%	0	0%	56%	1	11%	89%	0	0%	67%
10	0	0%	78%	0	0%	56%	0	0%	89%	0	0%	67%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	0	0%	0%	0	0%	0%	1	11%	11%	1	11%	11%
5	0	0%	0%	1	11%	11%	1	11%	22%	0	0%	11%
6	3	33%	33%	2	22%	33%	1	11%	33%	1	11%	22%
7	1	11%	44%	2	22%	56%	2	22%	56%	3	33%	56%
8	0	0%	44%	2	22%	78%	0	0%	56%	1	11%	67%
9	2	22%	67%	1	11%	89%	1	11%	67%	0	0%	67%
10	0	0%	67%	0	0%	89%	0	0%	67%	0	0%	67%

In Tabelle 3-25 sind die Ergebnisse der Auswertung der Formerkennung für Dreiecke der über 40 Jahre alten Probanden dargestellt. Bei dieser Probandengruppe erkennen 11% der Probanden bei 0,1 mm Formtiefe die Dreiecke. Bei 0,4 mm Formtiefe erkennen erstmals 100% der über 40 Jahre alten Probanden die Dreiecke. Ab hier werden mit Ausnahme der 0,8 mm tiefen Formen bei allen Formtiefen die Dreiecke von allen Probanden erkannt. Es sind jedoch immer mindestens 3 mm Formgröße notwendig, damit eine Formerkennung möglich ist.

Tabelle 3-25: Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden &gt; 40 Jahre (N=9)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	11%	11%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	0	0%	11%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
5	0	0%	11%	0	0%	0%	1	11%	11%	1	11%	11%
6	0	0%	11%	1	11%	11%	1	11%	22%	2	22%	33%
7	0	0%	11%	2	22%	33%	2	22%	44%	3	33%	67%
8	0	0%	11%	1	11%	44%	3	33%	78%	2	22%	89%
9	0	0%	11%	0	0%	44%	0	0%	78%	1	11%	100%
10	0	0%	11%	2	22%	67%	0	0%	78%	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	11%	11%	0	0%	0%
4	1	11%	11%	0	0%	0%	0	0%	11%	0	0%	0%
5	0	0%	11%	3	33%	33%	0	0%	11%	0	0%	0%
6	4	44%	56%	1	11%	44%	1	11%	22%	4	44%	44%
7	1	11%	67%	2	22%	67%	2	22%	44%	1	11%	56%
8	2	22%	89%	1	11%	78%	1	11%	56%	3	33%	89%
9	0	0%	89%	1	11%	89%	2	22%	78%	1	11%	100%
10	1	11%	100%	1	11%	100%	0	0%	78%	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	0	0%	0%	1	11%	11%	0	0%	0%	1	11%	11%
5	1	11%	11%	2	22%	33%	1	11%	11%	2	22%	33%
6	0	0%	11%	1	11%	44%	2	22%	33%	1	11%	44%
7	2	22%	33%	3	33%	78%	3	33%	67%	1	11%	56%
8	3	33%	67%	0	0%	78%	0	0%	67%	2	22%	78%
9	3	33%	100%	2	22%	100%	2	22%	89%	1	11%	89%
10	-	-	-	-	-	-	1	11%	100%	1	11%	100%

### Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt nach Geschlecht

An dieser Stelle wird auf die erkannten Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar getrennt für beide Geschlechter. Ein Vergleich zwischen beiden Geschlechtern findet an dieser Stelle allerdings nicht statt. Im Anhang in Kapitel A.1.4 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse der Formerkennung für die männlichen Probanden für die Kreise sind in Tabelle 3-26 aufgeführt. 50% der männlichen Probanden können Kreise bei einer Formtiefe von 0,1 mm richtig erkennen. Bei 0,2 mm Formtiefe sind es bereits 88%. Die Anzahl richtig erkannter Kreise schwankt mit weiter zunehmender

Formgröße zwischen 81% und 94%. Das Maximum von 94% männlicher Probanden welche Kreise als solche erkennen wird bei 1,25 mm und 2,0mm Formtiefe erreicht. Es sind mindestens 3 mm Formgröße notwendig, damit es zu einer Formerkennung der Kreise bei den männlichen Probanden kommt.

Tabelle 3-26: Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	1	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	1	6%	13%	2	13%	13%	0	0%	0%
4	0	0%	0%	1	6%	19%	4	25%	38%	0	0%	0%
5	0	0%	0%	1	6%	25%	1	6%	44%	4	25%	25%
6	2	13%	13%	2	13%	38%	4	25%	69%	5	31%	56%
7	2	13%	25%	5	31%	69%	2	13%	81%	3	19%	75%
8	1	6%	31%	2	13%	81%	0	0%	81%	1	6%	81%
9	2	13%	44%	1	6%	88%	0	0%	81%	1	6%	88%
10	1	6%	50%	0	0%	88%	1	6%	88%	0	0%	88%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	2	13%	13%
4	4	25%	25%	2	13%	13%	2	13%	13%	1	6%	19%
5	2	13%	38%	6	38%	50%	3	19%	31%	4	25%	44%
6	4	25%	63%	2	13%	63%	4	25%	56%	3	19%	63%
7	3	19%	81%	2	13%	75%	4	25%	81%	4	25%	88%
8	0	0%	81%	2	13%	88%	0	0%	81%	0	0%	88%
9	0	0%	81%	0	0%	88%	0	0%	81%	0	0%	88%
10	0	0%	81%	0	0%	88%	0	0%	81%	0	0%	88%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	3	19%	25%	2	13%	13%	4	25%	25%	3	19%	19%
5	8	50%	75%	7	44%	56%	4	25%	50%	2	13%	31%
6	1	6%	81%	4	25%	81%	4	25%	75%	6	38%	69%
7	2	13%	94%	1	6%	88%	1	6%	81%	3	19%	88%
8	0	0%	94%	0	0%	88%	0	0%	81%	1	6%	94%
9	0	0%	94%	0	0%	88%	0	0%	81%	0	0%	94%
10	0	0%	94%	0	0%	88%	0	0%	81%	0	0%	94%

Bei den Quadraten können nur 25% der männlichen Probanden die Form bei 0,1 mm Formtiefe richtig erkennen (vgl. Tabelle 3-27). Insgesamt sind die Werte für die Formerkennung bei den männlichen Probanden bei den unterschiedlichen Tiefen sehr schwankend. Ein klarer Trend ist nicht erkennbar. Maximal werden die Quadrate von 81% der männlichen Probanden erkannt. Dies ist bei 2 mm Formgröße der Fall.

Tabelle 3-27: Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	1	6%	6%	0	0%	0%
3	1	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	6%	2	13%	13%
4	1	6%	13%	1	6%	6%	3	19%	25%	2	13%	25%
5	0	0%	13%	1	6%	13%	3	19%	44%	2	13%	38%
6	1	6%	19%	2	13%	25%	3	19%	63%	1	6%	44%
7	0	0%	19%	3	19%	44%	1	6%	69%	1	6%	50%
8	0	0%	19%	1	6%	50%	1	6%	75%	1	6%	56%
9	1	6%	25%	1	6%	56%	0	0%	75%	1	6%	63%
10	0	0%	25%	0	0%	56%	0	0%	75%	0	0%	63%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	2	13%	13%	0	0%	0%	2	13%	13%
4	1	6%	6%	2	13%	25%	0	0%	0%	1	6%	19%
5	4	25%	31%	1	6%	31%	4	25%	25%	3	19%	38%
6	3	19%	50%	2	13%	44%	2	13%	38%	0	0%	38%
7	3	19%	69%	2	13%	56%	4	25%	63%	4	25%	63%
8	0	0%	69%	2	13%	69%	0	0%	63%	1	6%	69%
9	1	6%	75%	0	0%	69%	0	0%	63%	0	0%	69%
10	0	0%	75%	0	0%	69%	0	0%	63%	0	0%	69%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	1	6%	6%
4	1	6%	6%	1	6%	6%	2	13%	13%	2	13%	19%
5	1	6%	13%	4	25%	31%	3	19%	31%	3	19%	38%
6	5	31%	44%	4	25%	56%	2	13%	44%	3	19%	56%
7	2	13%	56%	1	6%	63%	0	0%	44%	4	25%	81%
8	1	6%	63%	1	6%	69%	0	0%	44%	0	0%	81%
9	0	0%	63%	0	0%	69%	0	0%	44%	0	0%	81%
10	1	6%	69%	0	0%	69%	0	0%	44%	0	0%	81%

Die Dreiecke werden von 13% der männlichen Probanden bei 0,1 mm Formtiefe wahrgenommen (vgl. Tabelle 3-28). Bereits bei 0,3 mm Formtiefe erkennen alle männlichen Probanden erstmals die Dreiecke. Ab dieser Formtiefe sind die Ergebnisse schwankend. Eine klare Tendenz, dass die Dreiecke mit zunehmender Formtiefe bereits ab geringeren Formgrößen erkannt werden wird nicht deutlich.



Tabelle 3-28: Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	6%	6%	1	6%	6%
4	0	0%	0%	1	6%	6%	1	6%	13%	0	0%	6%
5	0	0%	0%	0	0%	6%	3	19%	31%	6	38%	44%
6	0	0%	0%	6	38%	44%	5	31%	63%	2	13%	56%
7	0	0%	0%	1	6%	50%	3	19%	81%	4	25%	81%
8	0	0%	0%	1	6%	56%	2	13%	94%	1	6%	88%
9	1	6%	6%	0	0%	56%	0	0%	94%	1	6%	94%
10	1	6%	13%	2	13%	69%	1	6%	100%	0	0%	94%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	6%	13%	0	0%	0%	1	6%	6%	0	0%	0%
4	1	6%	19%	2	13%	13%	1	6%	13%	2	13%	13%
5	1	6%	25%	6	38%	50%	4	25%	38%	2	13%	25%
6	6	38%	63%	0	0%	50%	2	13%	50%	6	38%	63%
7	1	6%	69%	5	31%	81%	5	31%	81%	3	19%	81%
8	2	13%	81%	2	13%	94%	1	6%	88%	3	19%	100%
9	0	0%	81%	1	6%	100%	1	6%	94%	-	-	-
10	0	0%	81%	-	-	-	1	6%	100%	-	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	6%	6%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	1	6%	13%	2	13%	13%	2	13%	13%	2	13%	13%
5	5	31%	44%	3	19%	31%	3	19%	31%	4	25%	38%
6	2	13%	56%	5	31%	63%	5	31%	63%	4	25%	63%
7	3	19%	75%	4	25%	88%	3	19%	81%	3	19%	81%
8	4	25%	100%	1	6%	94%	2	13%	94%	1	6%	88%
9	-	-	-	1	6%	100%	1	6%	100%	1	6%	94%
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0%	94%

Die Ergebnisse der Auswertung der Formerkennung der Kreise für die weiblichen Probanden sind in Tabelle 3-29 dargestellt. Von ihnen erkennen bei einer Formtiefe von 0,1 mm 40% die Kreise. Ab hier steigt die Zahl an weiblichen Probanden welche die Kreise erkennen mit steigender Formtiefe bis zu 0,5 mm Formtiefe an und erreicht dort erstmals 100%. Danach sind die Werte schwankend, erreichen jedoch bei 1,75 und 2,0mm Formtiefe nochmals 100%. Insgesamt führt bei den weiblichen Probanden in den meisten Fällen eine Erhöhung der Formgröße über 7 mm nicht zu einer Erhöhung der Anzahl der Probanden welche die Kreise erkennen.

Tabelle 3-29: Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	7%	7%	1	7%	7%	0	0%	0%	1	7%	7%
3	1	7%	13%	3	20%	27%	3	20%	20%	2	13%	20%
4	0	0%	13%	2	13%	40%	3	20%	40%	2	13%	33%
5	1	7%	20%	2	13%	53%	1	7%	47%	3	20%	53%
6	1	7%	27%	3	20%	73%	3	20%	67%	3	20%	73%
7	1	7%	33%	0	0%	73%	1	7%	73%	1	7%	80%
8	1	7%	40%	0	0%	73%	2	13%	87%	1	7%	87%
9	0	0%	40%	0	0%	73%	0	0%	87%	0	0%	87%
10	0	0%	40%	0	0%	73%	0	0%	87%	0	0%	87%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	1	7%	7%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	7%	13%	2	13%	13%	3	20%	20%	4	27%	27%
4	3	20%	33%	4	27%	40%	4	27%	47%	1	7%	33%
5	6	40%	73%	2	13%	53%	4	27%	73%	3	20%	53%
6	2	13%	87%	3	20%	73%	2	13%	87%	5	33%	87%
7	1	7%	93%	1	7%	80%	1	7%	93%	1	7%	93%
8	1	7%	100%	2	13%	93%	0	0%	93%	0	0%	93%
9	-	-	-	0	0%	93%	0	0%	93%	0	0%	93%
10	-	-	-	0	0%	93%	0	0%	93%	0	0%	93%
Kreis Ø [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	1	7%	7%	1	7%	7%
3	2	13%	13%	3	20%	20%	2	13%	20%	1	7%	13%
4	2	13%	27%	3	20%	40%	2	13%	33%	3	20%	33%
5	2	13%	40%	4	27%	67%	6	40%	73%	5	33%	67%
6	6	40%	80%	2	13%	80%	1	7%	80%	3	20%	87%
7	1	7%	87%	1	7%	87%	3	20%	100%	2	13%	100%
8	0	0%	87%	1	7%	93%	-	-	-	0	0%	100%
9	0	0%	87%	0	0%	93%	-	-	-	0	0%	100%
10	0	0%	87%	0	0%	93%	-	-	-	0	0%	100%

Die Quadrate werden bei 0,1 mm Formtiefe von 33% der weiblichen Probanden erkannt (siehe Tabelle 3-30). Für zunehmende Formtiefen sind die Ergebnisse schwankend. Zwischen 47% und 93% der Quadrate werden bei den unterschiedlichen Formtiefen von den weiblichen Probanden erkannt. 100% Erkennung werden bei keiner Formtiefe erreicht.

Tabelle 3-30: Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	1	7%	7%	1	7%	7%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	1	7%	13%	1	7%	13%	1	7%	7%
4	1	7%	7%	3	20%	33%	4	27%	40%	2	13%	20%
5	1	7%	13%	2	13%	47%	1	7%	47%	3	20%	40%
6	1	7%	20%	0	0%	47%	1	7%	53%	3	20%	60%
7	0	0%	20%	1	7%	53%	2	13%	67%	0	0%	60%
8	1	7%	27%	0	0%	53%	0	0%	67%	1	7%	67%
9	1	7%	33%	0	0%	53%	0	0%	67%	1	7%	73%
10	0	0%	33%	1	7%	60%	0	0%	67%	0	0%	73%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	3	20%	20%
4	6	40%	40%	1	7%	7%	4	27%	27%	1	7%	27%
5	0	0%	40%	1	7%	13%	1	7%	33%	1	7%	33%
6	2	13%	53%	2	13%	27%	3	20%	53%	3	20%	53%
7	3	20%	73%	3	20%	47%	1	7%	60%	1	7%	60%
8	0	0%	73%	0	0%	47%	0	0%	60%	2	13%	73%
9	0	0%	73%	0	0%	47%	1	7%	67%	0	0%	73%
10	0	0%	73%	0	0%	47%	0	0%	67%	0	0%	73%
Quadrat Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	1	7%	7%
3	3	20%	20%	1	7%	7%	2	13%	13%	0	0%	7%
4	2	13%	33%	2	13%	20%	1	7%	20%	2	13%	20%
5	2	13%	47%	2	13%	33%	2	13%	33%	1	7%	27%
6	3	20%	67%	2	13%	47%	3	20%	53%	2	13%	40%
7	2	13%	80%	2	13%	60%	2	13%	67%	2	13%	53%
8	0	0%	80%	1	7%	67%	0	0%	67%	1	7%	60%
9	2	13%	93%	1	7%	73%	1	7%	73%	0	0%	60%
10	0	0%	93%	0	0%	73%	0	0%	73%	0	0%	60%

Bei den Dreiecken erkennen bei 0,1 mm Formtiefe 40% der weiblichen Probanden die Form richtig (vgl. Tabelle 3-31). Ab 0,2 mm Formtiefe werden die Dreiecke immer von mindestens 80% der weiblichen Probanden erkannt. 100% Formerkennung werden erstmal bei 0,4 mm Formtiefe erreicht.

Tabelle 3-31: Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15)

Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,1			0,2			0,3			0,4		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	1	7%	7%	0	0%	0%	1	7%	7%	2	13%	13%
4	1	7%	13%	1	7%	7%	3	20%	27%	2	13%	27%
5	1	7%	20%	4	27%	33%	3	20%	47%	3	20%	47%
6	1	7%	27%	1	7%	40%	1	7%	53%	3	20%	67%
7	1	7%	33%	6	40%	80%	1	7%	60%	3	20%	87%
8	1	7%	40%	0	0%	80%	3	20%	80%	2	13%	100%
9	0	0%	40%	0	0%	80%	0	0%	80%	#WERT!	-	-
10	0	0%	40%	1	7%	87%	0	0%	80%	#WERT!	-	-
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	0,5			0,6			0,8			1		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	2	13%	13%	0	0%	0%	3	20%	20%	1	7%	7%
4	2	13%	27%	3	20%	20%	3	20%	40%	3	20%	27%
5	4	27%	53%	3	20%	40%	1	7%	47%	1	7%	33%
6	2	13%	67%	4	27%	67%	2	13%	60%	4	27%	60%
7	1	7%	73%	3	20%	87%	1	7%	67%	1	7%	67%
8	2	13%	87%	1	7%	93%	2	13%	80%	2	13%	80%
9	0	0%	87%	0	0%	93%	1	7%	87%	1	7%	87%
10	1	7%	93%	1	7%	100%	0	0%	87%	0	0%	87%
Dreieck Kantenlänge [mm]	Tiefe [mm]											
	1,25			1,5			1,75			2		
	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %	Anzahl	%	kumu- lierte %
1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
2	0	0%	0%	2	13%	13%	0	0%	0%	0	0%	0%
3	0	0%	0%	0	0%	13%	0	0%	0%	0	0%	0%
4	4	27%	27%	2	13%	27%	5	33%	33%	3	20%	20%
5	2	13%	40%	4	27%	53%	2	13%	47%	4	27%	47%
6	2	13%	53%	4	27%	80%	3	20%	67%	3	20%	67%
7	1	7%	60%	1	7%	87%	2	13%	80%	1	7%	73%
8	2	13%	73%	0	0%	87%	0	0%	80%	1	7%	80%
9	3	20%	93%	2	13%	100%	1	7%	87%	1	7%	87%
10	0	0%	93%	-	-	-	1	7%	93%	1	7%	93%

### 3.3.6. Diskussion der Studie 1

Die Studie Werte für die Grenzen der Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit konkaver Formen. Allerdings gibt es auch einige Restriktionen.

Die Zeit, welche den Probanden gegeben wurde, um die Vertiefungen zu ertasten, war in diesem Versuch nicht limitiert. Die Versuchszeit schwankte daher stark. Es ist davon auszugehen, dass dies die Ergebnisse der Studie beeinflusste, in welcher Weise, ist jedoch schwer auszusagen. Eine längere Versuchszeit kann einerseits zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit führen, jedoch können sich andererseits auch Trainingseffekte einstellen. Ebenso kann vermutet werden, dass Probanden, welche sich mehr Zeit für jede der Versuchsreihen nah-

---

men, die Formen bereits bei geringerer Formgröße und -tiefe wahrnahmen und erkannten, da sie sich mehr Mühe gaben, den Versuch exakt durchzuführen. All diese Einflüsse können aufgrund des Versuchskonzeptes weder bestätigt noch ausgeschlossen werden. Es macht jedoch Sinn für zukünftige Versuche, die Versuchszeit zu limitieren, um die Vergleichbarkeit zwischen den Probanden zu verbessern.

Es fällt in den Versuchen ebenfalls auf, dass gerade die Wahrnehmungsraten bereits bei 0,1 mm Formtiefe sehr hoch sind. Daher ist zu vermuten, dass die Wahrnehmungsgrenze sich deutlich unter 0,1 mm Formtiefe befindet. Für eine klare Aussage über die Grenze der Wahrnehmung wären demnach Versuche mit geringeren Formtiefen sinnvoll.

Die Gruppe der über 40 Jahre alten Probanden war in diesem Versuch mit 9 Probanden gegenüber der Gruppe der Probanden bis 40 Jahre mit 22 Probanden relativ gering. Um konkrete Vergleiche zwischen männlichen und weiblichen Probanden ableiten zu können, sollten diese von Interesse sein, sollte für zukünftige Versuche auf eine bessere Gleichverteilung der Probanden auf die Altersgruppen geachtet werden.

Um weitere Gestaltungshinweise für ältere Probandengruppen ableiten zu können, sollten für zukünftige Versuche möglichst noch ältere Probanden über 60 Jahren in die Versuche mit einbezogen werden.

Die Übertragung der Ergebnisse auf reale Anwendungen erscheint ebenfalls noch fragwürdig, da das Versuchskonzept das strukturierte Abtasten einzelner Versuchsreihen beinhaltet. Dies entspricht weniger einer realen Anwendung, bei welcher verschiedene Bedienelemente beliebig auf einer Fläche verteilt sein können. Daher wird eine Untersuchung ohne ein geführtes Abtasten für reale Anwendungsfälle als sinnvoll erachtet. Die Vertiefungen sollten hierbei beliebig auf einer definierten Fläche verteilt sein.

---

### **3.4. Studie 2: Wahrnehmungsgrenze konkaver Formen in Silikon –ungeführte Bewegung**

Ziel dieser Studie war es, zu untersuchen, ab welcher Formgröße und -tiefe konkave Formen wahrgenommen werden können. Die Ergebnisse wurden ebenfalls für beide Geschlechter getrennt betrachtet. Eine Betrachtung unterschiedlicher Altersgruppen fand nicht statt, da nur Probanden unter 40 Jahren an den Versuchen teilnahmen.

Obwohl auch hier unterschiedliche konkave Formen verwendet wurden (Quadrate, Kreise und Dreiecke), wurde die Erkennung der Form nicht mit untersucht.

#### **3.4.1. Probanden der Studie 2**

Insgesamt nahmen 30 Probanden an der Studie teil. Die Probanden waren zwischen 20 und 29 Jahren alt. Das mittlere Alter betrug 25,57 Jahre mit einer Standardabweichung von 1,69 Jahren. Es handelte sich um 20 männliche und 10 weibliche Probanden.

#### **3.4.2. Testkörper der Studie 2**

Die Versuchsplatten wurden aus Silikon gefertigt und waren 12 x 12 cm groß. Insgesamt waren 96 Vertiefungen auf 20 Versuchsplatten verteilt. Die Anzahl der konkaven Formen je Platte war variabel, auf keiner Platte befanden sich jedoch mehr als 8 Formen. Die Formen hatten die Tiefen 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,5 mm. Die Formgrößen betrugen 3 mm, 4 mm, 5 mm und 7 mm. Jede Form war in jeder Tiefe und Größe zweimal vorhanden.

Es wurde auf eine gleichmäßige Verteilung der Formen auf den Platten geachtet, d. h., insgesamt befanden sich jeweils 24 Formen in den Ecken, den Kanten, der Umlaufzone und im mittleren Bereich der Platte. Die Zoneneinteilung kann Abbildung 3-2 entnommen werden. Hierdurch sollte ein Einfluss der Position der Vertiefung auf der Platte auf die Wahrnehmung ausgeschlossen werden.

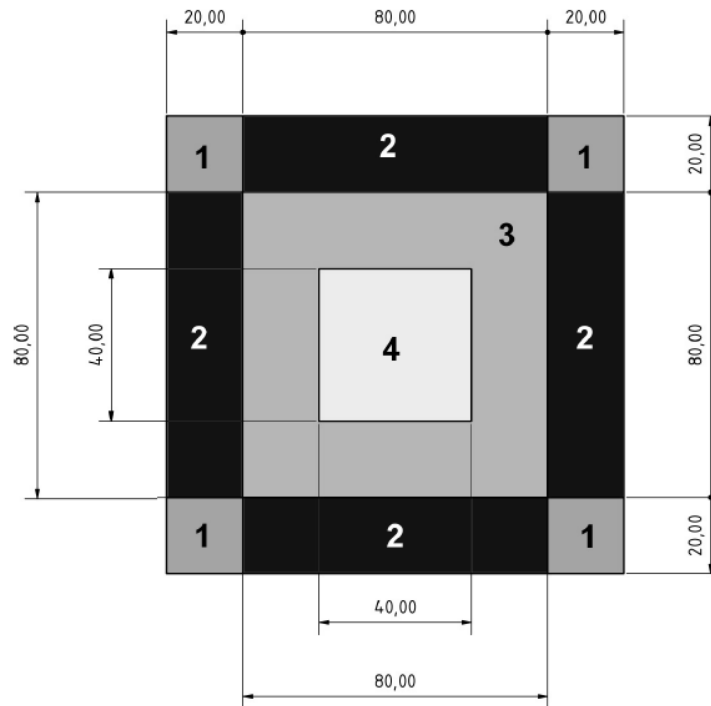


Abbildung 3-2: Zoneneinteilung der Versuchsplatte in Studie zwei (1 = Ecke, 2 = Kante, 3 = Umlaufzone, 4 = Mitte), Maße in mm

### 3.4.3. Versuchsaufbau der Studie 2

Sofern es den Probanden möglich war, das Institut für Arbeitswissenschaft zu besuchen, wurden die Versuche im Labor des Instituts durchgeführt. War es den Probanden nicht möglich, dies zu tun, wurde der Versuch bei den Probanden zu Hause durchgeführt.

Um eine visuelle Beeinflussung des Versuches auszuschließen, wurde ein Sichtschutz zwischen Proband und Versuchsplatte angebracht. Es wurde darauf geachtet, dass der Ellenbogen des Probanden auf dem Tisch auflag und das Handgelenk nicht abgewinkelt war.

### 3.4.4. Versuchsablauf der Studie 2

Die Probanden erhielten eine schriftliche Versuchseinweisung. Anschließend beantwortete der Versuchsleiter weitere Fragen, sofern vorhanden. Im Anschluss füllte der Proband einen Fragebogen zur Person aus. Der Versuchsablauf wurde den Probanden nochmals anhand einer Versuchsplatte erläutert. Die Tastzeit pro Platte war auf 60 s limitiert. Damit der Proband ein Gefühl für den Ablauf und die Dauer pro Platte erhielt, wurde vor Durchführung des eigentlichen Versuchs ein Probelauf absolviert.

Um einer Wiedererkennung der Platte im eigentlichen Versuch vorzubeugen, wurde die Versuchsplatte für den Testlauf um 90° im Vergleich zur Platte im eigentlichen Test gedreht. Die Versuchsplatten wurden permutiert.

---

Nach 10 Platten wurde zusätzlich zur Wechselzeit des Versuchskörpers, welche ca. 30 s dauerte, eine längere Pause gemacht, um Ermüdungseffekten vorzubeugen.

Hatte ein Proband die Platte vor dem Ablauf der 60 s abgetastet, so wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen. Die benötigte Zeit wurde notiert. Der Proband wurde gebeten, jede wahrgenommene Vertiefung dem Versuchsleiter mitzuteilen und dann unverzüglich das Abtasten der Platte fortzusetzen.

Alle Probanden führten den Versuch mit dem Zeigefinger der dominanten Hand durch. Der Finger wurde zum Start vom Versuchsleiter jeweils in der linken oberen Ecke aus Probandensicht positioniert. Die Platte sollte vom Probanden mit flach aufgelegtem Finger abgetastet werden, ohne den Fingernagel zu verwenden.

### **3.4.5. Ergebnisse der Studie 2**

Die Ergebnisse für die Anzahl wahrgenommener Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe sind in Tabelle 3-32 dargestellt. Betrachtet man die Kreise, so fällt auf, dass bei 0,1 mm Formtiefe und 3 mm Formgröße 61% der Formen wahrgenommen werden. Bei gleicher Formgröße aber 0,5 mm Formtiefe sind es hingegen bereits 93%. Betrachtet man die Anzahl der wahrgenommenen Kreise bei den Formtiefen 0,1 bis 0,3 mm, so zeigt sich mit zunehmender Formgröße immer eine Steigerung der wahrgenommenen Formen. Allerdings werden nur bei 0,5 mm Formtiefe und 7 mm Formgröße alle Kreise von den Probanden wahrgenommen. Für die Quadrate zeigt sich bei der geringsten Formtiefe und –Größe, dass 75% der Formen von den Probanden wahrgenommen werden. Bei gleichbleibender Formgröße von 3 mm aber Erhöhung der Formtiefe auf 0,5 mm kann eine Erhöhung der Anzahl wahrgenommener auf 93% erreicht werden. Entgegen der 0,1 mm bis 0,3 mm tiefen Formen kann bei den 0,5 mm tiefe Quadraten keine Steigerung der Anzahl wahrgenommener Formen mit Steigerung der Formgröße von 3 mm auf 7 mm erreicht werden. Insgesamt gibt es keine Paarung von Formgröße und Formtiefe bei welcher alle Quadrate von den Probanden wahrgenommen werden. Betrachtet man die Dreiecke bei 3 mm Formgröße und den unterschiedlichen Formtiefen, so fällt auf, dass die Anzahl wahrgenommener Formen bei 0,1 mm Formtiefe 49% beträgt und bei 0,5 mm Formtiefe 86%. Allerdings steigt die Anzahl wahrgenommener Dreiecke nicht kontinuierlich mit steigender Formtiefe an. Betrachtet man die Dreiecke bei konstanter Tiefe und zunehmender Formgröße, so zeigt sich zwar insgesamt die Tendenz, dass bei größeren Formen mehr der Dreiecke wahrgenommen werden, allerdings gibt es auch hier Schwankungen. Bei 0,2 mm und 0,5 mm Formtiefe können bei maximaler Formgröße von 7 mm alle Dreiecke wahrgenommen werden.

Insgesamt fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse auf, dass die Anzahl wahrgenommener Formen bei 0,3 mm Formtiefe teilweise niedriger sind als bei 0,2 mm Formtiefe. Der Grund hierfür ist unklar.



Tabelle 3-32: Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2 (N=30)

	Größe [mm]	Tiefe [mm]			
		0,1	0,2	0,3	0,5
Kreis	3	61%	65%	71%	93%
	4	85%	85%	79%	88%
	5	67%	91%	83%	91%
	7	96%	97%	96%	100%
Quadrat	3	75%	83%	82%	96%
	4	90%	98%	89%	94%
	5	72%	96%	96%	83%
	7	96%	97%	97%	96%
Dreieck	3	49%	77%	52%	86%
	4	79%	84%	81%	92%
	5	73%	75%	59%	88%
	7	79%	100%	88%	100%

### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt nach Geschlecht

In diesem Unterkapitel wird auf die wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar getrennt für beide Geschlechter. Die Ergebnisse für beide Geschlechter an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.2.1 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenübergestellt werden.

Im Anschluss erfolgte die Auswertung der Anzahl wahrgenommener Formen für die männlichen Probanden. Die Ergebnisse können Tabelle 3-33 entnommen werden. Betrachtet man die Kreise bei den unterschiedlichen Formtiefen so zeigt sich, abgesehen von 0,3 mm tiefen Kreisen, mit zunehmender Formgröße kein kontinuierlicher Anstieg der Anzahl wahrgenommener Formen. Gleiches gilt für die Betrachtung der Kreise bei konstanter Formgröße mit zunehmender Formtiefe. Bei 0,1 mm Formtiefe nehmen die Probanden 100% der 3 mm und der 7 mm großen Formen wahr. Für die Quadrate gilt ähnliches. Bei gleichbleibender Formtiefe nimmt die Anzahl wahrgenommener Formen mit zunehmender Formgröße nicht kontinuierlich zu. Gleiches gilt für Formen gleichbleibender Formgröße mit zunehmender Formtiefe, außer bei 3 mm großen Formen. Identische Feststellungen wie für die Quadrate gelten auch für die Dreiecke.

Tabelle 3-33: Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2, männliche Probanden (N=20)

	Größe [mm]	Tiefe [mm]			
		0,1	0,2	0,3	0,5
Kreis	3	55%	70%	63%	100%
	4	84%	88%	77%	88%
	5	67%	86%	85%	90%
	7	95%	95%	96%	100%
Quadrat	3	71%	81%	81%	100%
	4	85%	97%	92%	97%
	5	73%	96%	100%	85%
	7	94%	95%	97%	94%
Dreieck	3	42%	75%	53%	83%
	4	79%	84%	76%	94%
	5	73%	76%	65%	85%
	7	78%	100%	88%	100%

Die Ergebnisse der Auswertung der wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und-tiefe für die weiblichen Probanden sind in Tabelle 3-34 dargestellt. Bei den Kreisen zeigt sich lediglich bei den Formtiefen von 0,2 mm und 0,5 mm eine kontinuierliche Zunahme der Anzahl wahrgenommener Formen mit steigender Formgröße. Bei vier Form- und Tiefenpaarungen werden 100% der Formen wahrgenommen. Für Quadrate ergibt sich bei 0,3 mm Formtiefe eine stetige Zunahme der Anzahl wahrgenommener Formen mit zunehmender Formgröße. Insgesamt werden bei fünf Paarungen von Formgröße und –tiefe 100% der Formen wahrgenommen. Allerdings liegen bei jeder Formgrößen und –tiefen-Paarung mindestens 70% Formwahrnehmung. Bei den Dreiecken ist weder für konstante Tiefe noch für konstante Formgröße eine kontinuierliche Zunahme der Anzahl wahrgenommener Formen mit Größe bzw. Tiefe erkennbar. Nur bei zwei Paarungen von Formgröße und –tiefe werden 100% der Formen von den weiblichen Probanden wahrgenommen. Auch fällt bei der Formtiefe 0,3 mm auf, dass die Anzahl wahrgenommener Dreiecke bei 3 mm Formgröße nur bei knapp über der Hälfte und bei 5 mm Formgröße sogar unter 50% liegt.

Tabelle 3-34: Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2, weibliche Probanden (N=10)

	Größe [mm]	Tiefe [mm]			
		0,1	0,2	0,3	0,5
Kreis	3	70%	56%	85%	80%
	4	86%	80%	83%	89%
	5	67%	100%	81%	92%
	7	100%	100%	96%	100%
Quadrat	3	82%	88%	83%	88%
	4	100%	100%	85%	90%
	5	70%	96%	86%	80%
	7	100%	100%	97%	100%
Dreieck	3	64%	80%	51%	90%
	4	79%	85%	94%	89%
	5	74%	71%	47%	94%
	7	80%	100%	89%	100%

---

### 3.4.6. Diskussion der Studie 2

Die Studie gibt insgesamt gute Hinweise für die Gestaltung konkaver Formen für die Anwendung bei konkaven Rückmeldungen. Im Gegensatz zu Studie 1 handelte es sich hierbei um ein freies Abtasten einer vorgegebenen Fläche, was einer Anwendung bei einem Bedienelement näher kommt als das geführte Abtasten der konkaven Formen in Studie 1. Allerdings ist auch diese Studie einigen Einschränkungen unterworfen.

Die Studie lässt lediglich eine Aussage über die Wahrnehmung der konkaven Formen zu. Die Erkennung der Formen wurde nicht untersucht. Weitere Studien zur Untersuchung der Formerkennung bei ungeführten Bewegungen wären jedoch sinnvoll.

Interessant wäre ebenfalls ein Vergleich der Wahrnehmung und Erkennung bei geführten und ungeführten Bewegungen. Ein Vergleich zwischen Studie 1 und 2 erscheint hierbei nicht sinnvoll, da es sich um unterschiedliche Probanden und unterschiedliche Versuchsdesigns handelte.

Eine Überarbeitung der Versuchsobjekte für die geführte Bewegung für einen Vergleich geführter und ungeführter Bewegung wird ebenfalls empfohlen. Auch bei der geführten Bewegung wäre dabei die Gestaltung des Testkörpers so auszulegen, dass die Vertiefungen unterschiedliche Abstände zueinander haben. Ebenso sollten sich Vertiefungen unterschiedlicher Größe und Tiefe in einer Reihe befinden.

Insgesamt fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse auf, dass die Anzahl wahrgenommener Formen bei 0,3 mm Formtiefe teilweise niedriger sind als bei 0,2 mm Formtiefe. Der Grund hierfür kann mit den durchgeführten Versuchen nicht geklärt werden. Jedoch handelt es sich auch um vergleichsweise geringe Probandenzahlen, so dass geringe Unterschiede bei der Anzahl wahrgenommener Formen nicht überinterpretiert werden dürfen.

---

### 3.5. Studie 3: Zweipunktschwelle konkaver Formen im statischen Bereich für Silikon

Ziel der Untersuchung war die Ermittlung der Zweipunktschwelle im statischen Bereich für konkave Formen in Silikon. Die Ergebnisse wurden, zusätzlich zur allgemeinen Betrachtung, getrennt für beide Geschlechter und für die Altersgruppen bis 40, 40-60 und über 60 Jahre untersucht.

#### 3.5.1. Probanden der Studie 3

An der Studie nahmen insgesamt 30 Probanden teil. Hierbei handelte es sich um 10 junge Probanden unter 40 Jahren. Das mittlere Alter der jungen Probanden beträgt 25,04 Jahre mit einer Standardabweichung von 3,35 Jahren. Die Altersgruppe der 40- bis 60-jährigen beinhaltete 10 Probanden mit einem mittleren Alter von 52 Jahren und einer Standardabweichung von 4 Jahren. Die Gruppe der alten Probanden über 60 Jahren beinhaltete ebenfalls 10 Probanden. Das mittlere Alter beträgt hierbei 76,70 Jahre mit einer Standardabweichung von 4,20 Jahren. 15 der Probanden waren weiblich und 15 männlich.

#### 3.5.2. Testkörper der Studie 3

Zur Durchführung der Versuche wurden Versuchsplatten aus Silikon angefertigt. Auf den Versuchsplatten wurden konkave Formen in unterschiedlichen Abständen angebracht. Bei den Formen handelte es sich jeweils um Kreise mit einem Durchmesser von 3,0 mm. Diese Größe wurde auf Basis der vorangegangenen Studien 1 und 2 gewählt. Formen mit 3,0 mm wurden hierbei von den Probanden bereits in über 90 % der Fälle detektiert.

Auf einer Platte war die Tiefe der konkaven Formen konstant. Es wurden die Formtiefen 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,5 mm untersucht. Die Tiefen wurden ebenfalls auf Basis der vorangegangenen Versuche ausgewählt. Bis zu einer Tiefe von 0,3 mm war in den Studien 1 und 2 jeweils eine deutliche Verbesserung bei der Wahrnehmung und Erkennung der Formen zu erkennen. Ab einer Tiefe von 0,5 mm traten keine deutlichen Verbesserungen der Wahrnehmung und Erkennung mehr auf, weshalb keine Tiefen über 0,5 mm untersucht wurden.

Die Abstände der Vertiefungen betrugen wie folgt:

1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	3,0 mm	3,5 mm	4,0 mm	5,0 mm
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Auf jeder Platte befand sich zusätzlich zu den konkaven Formen in den jeweiligen Abständen eine einzelne Vertiefung. Alle Paarungen von 2 konkaven Formen mit den Abständen 1,5 mm bis 5,0 mm werden im Folgenden als Punktpaar bezeichnet.

---

### **3.5.3. Versuchsaufbau der Studie 3**

Die Versuche wurden bei den Probanden zu Hause in gewohnter Umgebung durchgeführt. Es wurde auf eine ruhige Umgebung geachtet, um eine Ablenkung zu vermeiden.

Um eine visuelle Beeinflussung auszuschließen, wurde eine Barriere zwischen Proband und Versuchsplatte platziert. Es wurde darauf geachtet, dass das Handgelenk nicht abgewinkelt war und der Ellenbogen auf dem Tisch auflag.

### **3.5.4. Versuchsablauf der Studie 3**

Der Versuch wurde mit dem Zeigefinger der dominanten Hand durchgeführt. Die Einweisung der Probanden erfolgte in schriftlicher Form. Der Versuchsleiter stand im Anschluss und während des gesamten Versuches für weitere Fragen zur Verfügung. Vor Beginn des Versuches füllte der Proband einen Fragebogen zur Person aus.

Die Reihenfolge der abgetasteten Abstände und Tiefen wurde während der Versuche permutiert. Ebenso wurden nach dem Zufallsprinzip die einzelnen Punkte in die Permutation mit aufgenommen.

Der Versuchsleiter legte den Finger des Probanden jeweils auf die abzutastenden Vertiefungen auf. Der Proband hatte 5 s Zeit diesen abzutasten. Bei Bedarf durfte die Abtastung wiederholt werden. Die zeitliche Limitierung diente zum Ausschluss von Ermüdungseffekten. Am Anschluss wurde der Proband gebeten anzugeben, ob er eine oder zwei Vertiefungen gespürt hatte.

### **3.5.5. Ergebnisse der Studie 3**

In Tabelle 3-35 sind die Anzahl richtig wahrgenommener Einzelpunkte und Punktpaare für die unterschiedliche Punktabstände und Tiefen aufgetragen. Betrachtet man nur die Einzelpunkte, so wird deutlich, dass sich die Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte für alle Tiefen im Bereich 81% bis 87% bewegt und somit recht konstant ist. Betrachtet man die Punktabstände bei konstanter Tiefe, so zeigt sich bei 0,1 mm und 0,5 mm Punkttiefe eine Zunahme der richtig identifizierten Punktpaare bis 3,5 mm Punktabstand. Bei weiterer Erhöhung sind die Anzahl richtig erkannter Punktpaare bei größeren Punktabständen wieder. Bei 0,3 mm Formtiefe sinkt die Anzahl richtiger Antworten bereits bei 3,5 mm Punktabstand und bei 0,2 mm Punkttiefe sind die Ergebnisse schwankend. Insgesamt fällt auf, dass in keinem Fall 100% der Punktpaare oder Einzelpunkte richtig erkannt wurden.

Tabelle 3-35: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3 (N=30)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	65%	87%	83%	83%
2	75%	72%	85%	93%
2,5	80%	85%	95%	95%
3	80%	83%	87%	87%
3,5	83%	88%	80%	88%
4	65%	77%	78%	70%
5	47%	70%	70%	67%
Einzelpunkt	81%	85%	87%	87%

### Wahrgenommene Einzelpunkte und Punktpaare in Abhängigkeit von Punktabstand und –tiefe getrennt nach Alter

Im Folgenden wird auf die Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Abhängigkeit von Punktabstand und –tiefe eingegangen, und zwar für die untersuchten Altersgruppen <40 Jahre, 40-60 Jahre und  $\geq 60$  Jahre. Die Altersgruppen an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.3.1 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für die drei Altersgruppen gegenübergestellt werden.

Im Anschluss erfolgte die Auswertung der richtig erkannten Einzelpunkte und Punktpaare für die unter 40 Jahre alten Probanden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-36 dargestellt. Insgesamt zeigt sich deutlich, dass bei allen Formtiefen über 90% der Einzelpunkte richtig als solche erkannt wurden. Bei der Betrachtung der Punktpaare fällt auf, dass bei allen Formtiefen bis 3,5 mm Punktabstand, bei 0,2 mm Formtiefe sogar bis 4 mm Punktabstand, die Anzahl der richtig erkannten Punktpaare immer über 90%, häufig sogar bei 100% liegt. Bei Punktabständen über 3,5 mm sinkt die Anzahl richtiger Antworten bei allen Formtiefen wieder ab.

Tabelle 3-36: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden <40 Jahre (N=10)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	95%	100%	100%	100%
2	100%	100%	95%	95%
2,5	100%	100%	100%	100%
3	95%	100%	100%	100%
3,5	95%	100%	100%	95%
4	85%	95%	85%	85%
5	65%	85%	90%	90%
Einzelpunkt	95%	98%	97%	96%

Von den 40-60 Jahre alten Probanden werden zwischen 72% und 84% der Einzelpunkte richtig als solche erkannt (siehe Tabelle 3-37). Dabei steigt die Anzahl richtiger erkannter Einzelpunkte nicht kontinuierlich mit zunehmender Punkttiefe an. Betrachtet man die Anzahl richtig erkannter Punktpaare bei konstanter Punkttiefe, so steigt bei 0,1 mm Punkttiefe die Anzahl richtiger Antworten bis zu 3,0mm Punktabstand, bei 0,3 mm und 0,5 mm Punkttiefe bis 2,5 mm Punktabstand. Im Anschluss sinkt die Anzahl richtig erkannter Punktpaare bei den 40-60 Jahre alten Probanden wieder. Bei 0,2 mm Punkttiefe sind die Ergebnisse insgesamt schwankend,

ohne klare Tendenzen. In keinem Fall erreichen die 40-60 Jahre alten Probanden 100% richtig erkannte Punktpaare.

Tabelle 3-37: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden 40-60 Jahre (N=10)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	55%	90%	70%	80%
2	65%	70%	75%	90%
2,5	65%	65%	90%	90%
3	90%	75%	80%	85%
3,5	80%	85%	65%	95%
4	55%	70%	75%	65%
5	45%	60%	80%	65%
Einzelpunkt	78%	78%	84%	72%

Für die über 60 Jahre alten Probanden ergibt sich eine Anzahl von 71% bis 91% richtig erkannter Einzelpunkte, wo bei die Anzahl mit steigender Tiefe zunimmt (siehe Tabelle 3-38). Bei den Punkttiefen 0,1 mm und 0,2 mm sind die Anzahlen richtig erkannter Punktpaare bis 3,5 mm Punktabstand schwankend und sinken dann mit Zunahme des Punktabstandes sinkt die Anzahl richtiger Antworten. Bei den Punkttiefen 0,3 und 0,5 mm steigt die Anzahl richtig erkannter Punktpaare bis 2,5 mm Punktabstand und sind anschließend wieder. In keinem Fall wurden alle Punktpaare von den Probanden richtig erkannt.

Tabelle 3-38: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden >60 Jahre (N=10)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	45%	70%	80%	70%
2	60%	45%	85%	95%
2,5	75%	90%	95%	95%
3	55%	75%	80%	75%
3,5	75%	80%	75%	75%
4	55%	65%	70%	60%
5	30%	65%	40%	40%
Einzelpunkt	71%	79%	79%	91%

### Wahrgenommene Einzelpunkte und Punktpaare in Abhängigkeit von Punktabstand und –tiefe getrennt nach Geschlecht

Im Anschluss erfolgte die Auswertung der richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Abhängigkeit vom Geschlecht. Ergebnisse für beide Geschlechter an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.3.2 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenübergestellt werden.

In Tabelle 3-39 sind die Ergebnisse für die männlichen Probanden dargestellt. Die Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte beträgt je nach Formtiefe bei den männlichen Probanden zwischen 79% und 87%. Die Anzahl richtig

erkannter Punktpaare steigt bei 0,1 mm Punkttiefe bis 3,5 mm an, bei allen anderen Formtiefen bis 2,5 mm Punktabstand. In keinem Fall werden 100% der Punktpaare richtig als solche erkannt.

Tabelle 3-39: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, männliche Probanden (N=15)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	53%	77%	70%	73%
2	70%	57%	77%	93%
2,5	80%	83%	93%	97%
3	83%	83%	87%	80%
3,5	93%	87%	87%	87%
4	77%	73%	87%	63%
5	53%	77%	73%	67%
Einzelpunkt	79%	87%	87%	85%

Von den weiblichen Probanden werden zwischen 83% und 89% der Einzelpunkte als solche erkannt (vgl. Tabelle 3-40). Auch von den weiblichen Probanden werden in keinem Fall alle Punktpaare richtig als solche wahrgenommen. Insgesamt sind die Ergebnisse bis 3,5 mm Punktabstand bei den Punkttiefen 0,1 mm und 0,2 mm schwankend. Bei 0,5 mm Punkttiefe bleibt die Anzahl richtig identifizierter Punktpaare bis 3,0mm konstant. Bei allen Formtiefen fällt die Anzahl richtig erkannter Punktpaare bei den weiblichen Probanden ab 4 mm Punktabstand ab.

Tabelle 3-40: Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, weibliche Probanden (N=15)

Abstand [mm]	Tiefe [mm]			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	77%	97%	97%	93%
2	80%	87%	93%	93%
2,5	80%	87%	97%	93%
3	77%	83%	87%	93%
3,5	73%	90%	73%	90%
4	53%	80%	70%	77%
5	40%	63%	67%	67%
Einzelpunkt	84%	83%	87%	89%

### 3.5.6. Diskussion der Studie 3

Insgesamt haben die Ergebnisse gezeigt, dass Punkte im Abstand bis 3,5 mm sehr gut als zwei Punkte wahrgenommen werden. Teilweise werden sogar bei 1,5 mm Abstand, dem geringsten Punktabstand in diesem Versuch, 100 % der Einzelpunkte und Punktpaare richtig als solche erkannt. Daher wird für zukünftige Versuche empfohlen, gegebenenfalls weitere Punktabstände unterhalb von 1,5 mm zu untersuchen.

Die Größe der Punkte im Versuch betrug 3 mm. Diese wurde nicht variiert. Eventuell könnten weitere Versuche mit unterschiedlichen Punktgrößen durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob sich die Zweipunktschwelle mit Größe des Punktes verändert. Für die konkaven Formen wird jedoch empfohlen, die Punkte eher im Bereich 3 mm und größer, nicht kleiner, zu wählen, um sicherzustellen, dass die Punkte überhaupt ertastet werden können.



---

Die Versuche zeigten, dass bereits ab 0,2 mm Formtiefe eine weitere Erhöhung der Formtiefe kaum zu einer weiteren Verbesserung bei der Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare führt. Daher sollten bei zukünftigen Versuchen eher Tiefen bis maximal 0,2 mm Formtiefe gewählt werden.

Es ist auch davon auszugehen, dass das Material die Wahrnehmung beeinflusst. So wird beim Überstreichen das Silikon, da es verformbar ist, mit verzogen. Wie dies die Wahrnehmung beeinflusst, ist nicht bekannt. Entsprechende Tests mit anderen Materialien oder mit Beschichtungen des Silikons werden daher als sinnvoll erachtet. Auch könnten andere Materialien die Akzeptanz erhöhen, da das Silikon von den Probanden als klebrig und unangenehm empfunden wurde.

---

### **3.6. Studie 4: Materialeinfluss auf die Wahrnehmungs- und Erkennungsgrenze konkaver Formen**

Ziel der Studie war es, zu untersuchen, ob die Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen durch das Material des Testkörpers beeinflusst werden kann. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Untersuchung für die Altersgruppen unter 40 und über 40 Jahre sowie für beide Geschlechter separat betrachtet.

#### **3.6.1. Probanden der Studie 4**

An der Studie nahmen 40 Probanden teil. Die Gruppe der Probanden bis 40 Jahre umfasste 20 Probanden zwischen 23 und 31 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 26,15 Jahren (Standardabweichung 1,89 Jahre). Die Gruppe der Probanden über 40 Jahre umfasste 20 Probanden zwischen 44 und 75 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 57,20 Jahren (Standardabweichung 9,32). Es handelte sich um 20 männliche und 20 weibliche Probanden.

#### **3.6.2. Testkörper der Studie 4**

Zur Durchführung dieses Versuchs wurden Testkörper entsprechend dem Layout der Testplatten in Studie 1 (siehe Abbildung 3-1) erstellt. Für diesen Versuch wurde sich auf die Tiefen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm beschränkt, da eine Untersuchung aller Tiefen wie in Studie 1 den Versuch zu umfangreich gemacht hätte. Die Tiefen wurden auf Basis der Ergebnisse von Studie 1 ausgewählt.

Es sollten drei unterschiedliche Materialien getestet werden. Diese sollten sich bezüglich ihrer Härte, Reibwerte und thermischen Eigenschaften unterscheiden. Es wurden die folgenden Materialien ausgewählt:

- Silikon,
- Aluminium,
- PVC.

Silikon wurde verwendet, da die DEA aus Silikon bestehen. Die Silikon-Platten sollten als Referenz dienen.

Als Kontrast sollte ein sehr hartes Material gewählt werden, welches eine glatte Oberfläche besitzt. Daher wurde sich für einen metallischen Werkstoff entschieden, in diesem Fall Aluminium, da dieses leicht zu zerspanen ist. Somit konnten die Versuchsplatten mit einer geeigneten glatten Oberflächenqualität erstellt werden. Die Kanten der konkaven Formen wurden entsprechend nachgearbeitet, damit sie keinen Grat mehr hatten, welcher einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung haben könnte.

Die Wahl für das dritte Material fiel auf PVC, da dieses sich durch seine thermischen Eigenschaften vom Aluminium sowie durch seine Härte vom Silikon unterscheidet. PVC ist ebenfalls leicht zerspanbar, was günstig für die Herstellung der Testkörper war. Auch hier wurden die konkaven Formen, sofern nötig, entgratet, um eine

Beeinflussung der Versuche durch die Grate zu vermeiden. Die entsprechenden Daten für die drei Materialien sind in Tabelle 3-41 dargestellt.

Tabelle 3-41: Dichte, E-Modul, Härte und Wärmeleitfähigkeit für Silikon, Aluminium und PVC

	Silikon	Aluminium	PVC
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,7-1,0	2,7	1,51
E-Modul[GPa]	0,01-0,1	70	1-3,5
Härte	6 Shore A	50-140 Brinell	Je nach Zusatz von Weichmachern
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0,18	235	0,15

### 3.6.3. Versuchsaufbau der Studie 4

Die Versuche fanden bei den Probanden zu Hause in gewohnter Umgebung statt. Zwischen dem Probanden und der Testplatte wurde eine Barriere platziert, damit der Proband die Testplatte selbst nicht sehen konnte.

Die Versuchsplatten wurden so angeordnet, dass der Proband den Ellenbogen auf dem Tisch aufgelegt hatte und das Handgelenk nicht abgewinkelt war.

### 3.6.4. Versuchsablauf der Studie 4

Die Versuchseinweisung fand in schriftlicher Form statt. Im Anschluss wurden dem Probanden, sofern vorhanden, offenen Fragen beantwortet. Der Proband wurde nochmals gebeten, das Ertasten einer Vertiefung oder deren Form erst anzugeben, wenn er sich sicher war, etwas ertastet bzw. die Form erkannt zu haben. Im Anschluss füllte der Proband noch einen Fragebogen zur Person aus. Die Versuchszeit variierte zwischen 25 min und 2 h.

Alle Probanden führten den Versuch mit dem Zeigefinger der dominanten Hand durch. Der entsprechende Finger wurde jeweils in der entsprechenden zu testenden Reihe am Rand der Platte positioniert. Die Probanden konnten die Reihe anhand einer aufgelegten Hilfslinie abtasten.

Den Probanden stand es jederzeit frei, eine Pause zu machen. Ein Rückwärtstasten war nicht erlaubt, d. h., der Finger durfte nicht entlang der Hilfslinie zurück Richtung kleinerer Form bewegt werden. Der Proband meldete dem Versuchsleiter, wenn er eine Form wahrgenommen hatte und wenn er meinte diese erkannt zu haben. Der Versuchsleiter notierte die jeweilige Formgröße. Wenn ein Proband die Form erkannt hatte, wurde die Platte getauscht und der Rest der Reihe nicht abgetastet.

Die Reihenfolge der Versuchsplatten wurde permutiert. Es gab hierbei keine Logik bei der Reihenfolge von Tiefe, Form oder Material.

### 3.6.5. Ergebnisse der Studie 4

#### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe

Die Ergebnisse für die Wahrnehmung der Formen bei den getesteten Materialien sind in Tabelle 3-42 dargestellt. Betrachtet man die Kreise, so ist zu erkennen, dass ab 0,3 mm Formtiefe alle Kreise von den Probanden wahrgenommen werden. Bei Aluminium und PVC werden bereits bei 0,1 mm Formtiefe alle Kreise wahrgenommen. Die Betrachtung der Formgröße zeigt, dass bei Silikon mindestens 4 mm, bei PVC und Aluminium mindestens 4 mm Formgröße notwendig sind, damit die Kreise von allen Probanden wahrgenommen werden.

Auch bei den Quadraten werden bei Silikon ab 0,3 mm, bei den anderen beiden Materialien ab 0,1 mm Formtiefe alle Kreise wahrgenommen. Bei Silikon sind dafür mindestens 5 mm Formgröße nötig (bei 0,5 mm Formtiefe), Bei PVC und Aluminium sind, je nach Formtiefe, bereits 3 bzw. 2 mm Formgröße ausreichend für eine Wahrnehmung der Kreise durch alle Probanden. Die benötigte Formgröße für die Wahrnehmung der Quadrate durch 100% der Probanden nimmt bei Silikon und Aluminium mit zunehmender Tiefe stetig ab.

Auch bei Dreiecken werden bei Silikon erstmals bei 0,3 mm Formtiefe alle Formen wahrgenommen, bei PVC und Aluminium bereits bei 0,1 mm Formtiefe. Bei PVC und Aluminium sind, unabhängig von der Formtiefe, 5 mm Formgröße notwendig, damit alle Probanden die Dreiecke wahrnehmen.

Tabelle 3-42: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	8	20%	20%	9	23%	23%	9	23%	23%
		2	14	35%	55%	16	40%	63%	18	45%	68%
		3	11	28%	83%	8	20%	83%	9	23%	90%
		4	4	10%	93%	4	10%	93%	2	5%	95%
		5	2	5%	98%	3	8%	100%	1	3%	98%
		6	0	0%	98%	-	-	-	1	3%	100%
		7	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
		8	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	14	35%	35%	9	23%	23%	8	20%	20%
		2	15	38%	73%	22	55%	78%	20	50%	70%
		3	5	13%	85%	7	18%	95%	9	23%	93%
		4	3	8%	93%	1	3%	98%	2	5%	98%
		5	1	3%	95%	0	0%	98%	1	3%	100%
		6	0	0%	95%	0	0%	98%	-	-	-
		7	0	0%	95%	0	0%	98%	-	-	-
		8	0	0%	95%	1	3%	100%	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-42: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) (forts.)

Silikon	Dreieck	1	11	28%	28%	5	13%	13%	3	8%	8%
		2	9	23%	50%	13	33%	45%	17	43%	50%
		3	13	33%	83%	10	25%	70%	12	30%	80%
		4	2	5%	88%	7	18%	88%	7	18%	98%
		5	1	3%	90%	3	8%	95%	1	3%	100%
		6	0	0%	90%	1	3%	98%	-	-	-
		7	3	8%	98%	1	3%	100%	-	-	-
		8	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
PVC	Kreis	1	3	8%	8%	4	10%	10%	4	10%	10%
		2	26	65%	73%	24	60%	70%	22	55%	65%
		3	7	18%	90%	7	18%	88%	13	33%	98%
		4	4	10%	100%	5	13%	100%	1	3%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	5	13%	13%	2	5%	5%	4	10%	10%
		2	23	58%	70%	33	83%	88%	26	65%	75%
		3	12	30%	100%	5	13%	100%	9	23%	98%
		4	-	-	-	-	-	-	1	3%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	10	25%	25%	10	25%	25%	19	48%	48%
		3	22	55%	80%	23	58%	83%	12	30%	78%
		4	6	15%	95%	4	10%	93%	7	18%	95%
		5	2	5%	100%	3	8%	100%	2	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	1	3%	3%	11	28%	28%	13	33%	33%
		2	24	60%	63%	21	53%	80%	25	63%	95%
		3	14	35%	98%	6	15%	95%	1	3%	98%
		4	1	3%	100%	2	5%	100%	0	0%	98%
		5	-	-	-	-	-	-	1	3%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-42: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) (forts.)

Aluminium	Quadrat	1	3	8%	8%	13	33%	33%	14	35%	35%
		2	29	73%	80%	21	53%	85%	26	65%	100%
		3	7	18%	98%	6	15%	100%	-	-	-
		4	1	3%	100%	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	16	40%	40%	16	40%	40%	36	90%	90%
		3	17	43%	83%	17	43%	83%	2	5%	95%
		4	5	13%	95%	6	15%	98%	1	3%	98%
		5	2	5%	100%	1	3%	100%	1	3%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe nach Alter

In diesem Unterkapitel wird auf die wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar für die untersuchten Altersgruppen <40 Jahre und  $\geq 40$  Jahre. Die Altersgruppen an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.4.1 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Altersgruppen gegenübergestellt werden.

In Tabelle 3-43 sind die Ergebnisse der Auswertung für die wahrgenommenen Formen für die unterschiedlichen Materialien bei der Gruppe der unter 40 Jahre alten Probanden aufgetragen. Bei allen Materialien nehmen alle Probanden bei allen Formgrößen die Kreise wahr. Bei Silikon werden hierfür bei allen Formtiefen 3 mm Formgröße benötigt, bei PVC und Aluminium jeweils 2 mm bei 0,3 mm Formtiefe und 3 mm bei 0,1 und 0,3 mm Formtiefe.

Auch bei den Quadraten ist bei allen Materialien und Formtiefen eine Formwahrnehmung durch alle Probanden möglich. Bei Silikon und Aluminium werden bei 0,1 und 0,3 mm Formtiefe je 3 mm Formgröße benötigt, damit die Quadrate von allen Probanden wahrgenommen werden können, bei 0,5 mm Formtiefe sind 2 mm Formgröße ausreichend. Bei PVC sind bereits ab 0,3 mm Formgröße ausreichend, damit alle Probanden die Quadrate wahrnehmen.

Ebenso können die Dreiecke bei allen Formtiefen und Materialien von allen Probanden wahrgenommen werden. Bei Silikon und PVC sind dafür mindestens 3 mm Formgröße notwendig, bei Aluminium sind bereits 2 mm Formgröße ausreichend.

Tabelle 3-43: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &lt;40 Jahre (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	6	30%	30%	6	30%	30%	7	35%	35%
		2	9	45%	75%	11	55%	85%	8	40%	75%
		3	5	25%	100%	3	15%	100%	5	25%	100%
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	8	40%	40%	6	30%	30%	7	35%	35%
		2	9	45%	85%	13	65%	95%	13	65%	100%
		3	3	15%	100%	1	5%	100%	-	-	-
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	6	30%	30%	3	15%	15%	2	10%	10%
		2	6	30%	60%	10	50%	65%	11	55%	65%
		3	6	30%	90%	6	30%	95%	7	35%	100%
		4	1	5%	95%	1	5%	100%	-	-	-
		5	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PVC	Kreis	1	3	15%	15%	3	15%	15%	3	15%	15%
		2	15	75%	90%	17	85%	100%	16	80%	95%
		3	2	10%	100%	-	-	-	1	5%	100%
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-43: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &lt;40 Jahre (N=20) (forts.)

PVC	Quadrat	1	3	15%	15%	2	10%	10%	4	20%	20%
		2	16	80%	95%	18	90%	100%	16	80%	100%
		3	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	8	40%	40%	8	40%	40%	16	80%	80%
		3	11	55%	95%	12	60%	100%	4	20%	100%
		4	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	1	5%	5%	10	50%	50%	11	55%	55%
		2	18	90%	95%	10	50%	100%	8	40%	95%
		3	1	5%	100%	-	-	-	1	5%	100%
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	3	15%	15%	9	45%	45%	11	55%	55%
		2	16	80%	95%	10	50%	95%	9	45%	100%
		3	1	5%	100%	1	5%	100%	-	-	-
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	15	75%	75%	13	65%	65%	20	100%	100%
		3	5	25%	100%	6	30%	95%	-	-	-
		4	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Von den Probanden über 40 werden die Kreise bei Silikon ab 0,3 mm Formtiefe, bei PVC und Aluminium bereits ab 0,1 mm Formtiefe von allen Probanden wahrgenommen (siehe Tabelle 3-44). Bei PVC sind dafür bei allen drei Formtiefen 4 mm Formgröße notwendig, bei Silikon mindestens 5 mm. Bei Aluminium sind mindestens 4 mm notwendig, um eine Wahrnehmung der Kreise durch alle Probanden über 40 zu gewährleisten.

Bei den Quadraten sind, wie bei den Kreisen, für Silikon 0,3 und bei den anderen Materialien 0,1 mm notwendig, damit die Quadrate von allen Probanden wahrgenommen werden. Für Silikon werden mindestens 5 mm, bei PVC mindestens 3 mm und bei Aluminium mindestens 2 mm Formgröße benötigt, damit alle Probanden die Quadrate wahrnehmen können. Bei Silikon und Aluminium nimmt die benötigte Formgröße für Wahrnehmung der Quadrate mit zunehmender Formtiefe stetig ab.

Tabelle 3-44: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden >40 Jahre (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	2	10%	10%	3	15%	15%	2	10%	10%
		2	5	25%	35%	5	25%	40%	10	50%	60%
		3	6	30%	65%	5	25%	65%	4	20%	80%
		4	4	20%	85%	4	20%	85%	2	10%	90%
		5	2	10%	95%	3	15%	100%	1	5%	95%
		6	0	0%	95%	-	-	-	1	5%	100%
		7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	6	30%	30%	3	15%	15%	1	5%	5%
		2	6	30%	60%	9	45%	60%	7	35%	40%
		3	2	10%	70%	6	30%	90%	9	45%	85%
		4	3	15%	85%	1	5%	95%	2	10%	95%
		5	1	5%	90%	0	0%	95%	1	5%	100%
		6	0	0%	90%	0	0%	95%	-	-	-
		7	0	0%	90%	0	0%	95%	-	-	-
		8	0	0%	90%	1	5%	100%	-	-	-
		9	0	0%	90%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	90%	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	5	25%	25%	2	10%	10%	1	5%	5%
		2	3	15%	40%	3	15%	25%	6	30%	35%
		3	7	35%	75%	4	20%	45%	5	25%	60%
		4	1	5%	80%	6	30%	75%	7	35%	95%
		5	0	0%	80%	3	15%	90%	1	5%	100%
		6	0	0%	80%	1	5%	95%	-	-	-
		7	3	15%	95%	1	5%	100%	-	-	-
		8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-44: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &gt;40 Jahre (N=20) (forts.)

PVC	Kreis	1	0	0%	0%	1	5%	5%	1	5%	5%
		2	11	55%	55%	7	35%	40%	6	30%	35%
		3	5	25%	80%	7	35%	75%	12	60%	95%
		4	4	20%	100%	5	25%	100%	1	5%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	2	10%	10%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	7	35%	45%	15	75%	75%	10	50%	50%
		3	11	55%	100%	5	25%	100%	9	45%	95%
		4	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	2	10%	10%	2	10%	10%	3	15%	15%
		3	11	55%	65%	11	55%	65%	8	40%	55%
		4	5	25%	90%	4	20%	85%	7	35%	90%
		5	2	10%	100%	3	15%	100%	2	10%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	1	5%	5%	2	10%	10%
		2	6	30%	30%	11	55%	60%	17	85%	95%
		3	13	65%	95%	6	30%	90%	0	0%	95%
		4	1	5%	100%	2	10%	100%	0	0%	95%
		5	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	4	20%	20%	3	15%	15%
		2	13	65%	65%	11	55%	75%	17	85%	100%
		3	6	30%	95%	5	25%	100%	-	-	-
		4	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-44: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden >40 Jahre (N=20) (forts.)

Aluminium	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	1	5%	5%	3	15%	15%	16	80%	80%
		3	12	60%	65%	11	55%	70%	2	10%	90%
		4	5	25%	90%	5	25%	95%	1	5%	95%
		5	2	10%	100%	1	5%	100%	1	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zur Wahrnehmung der Dreiecke durch alle Probanden über 40 Jahre sind bei Silikon 0,3 mm Formtiefe, bei PVC und Aluminium bereits 0,1 mm Formtiefe ausreichend. Bei Silikon werden mindestens 5 mm Formgröße für eine 100%-ige Wahrnehmung der Dreiecke durch die Probanden benötigt. Bei PVC und Aluminium beträgt die hierfür nötige Formgröße bei allen Formtiefen 5 mm.

#### Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe nach Geschlecht

In diesem Unterkapitel wird auf die wahrgenommenen Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe getrennt für beide Geschlechter eingegangen. Die Ergebnisse der beiden Gruppen an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.4.2 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenübergestellt werden.

Tabelle 3-45 fasst die Ergebnisse der Auswertung wahrgenommener Formen bei den untersuchten Materialien für männliche Probanden zusammen. Die Kreise können von allen Probanden bei allen Formtiefen wahrgenommen werden. Dabei sind bei Silikon mindestens 4 mm, Bei PVC und Aluminium mindestens 3 mm Formgröße notwendig. Bei PVC nimmt die benötigte Formgröße für eine 100%-ige Wahrnehmung der Kreise durch die männlichen Probanden mit zunehmender Formtiefe stetig ab.

Bei den Quadraten können erst ab 0,3 mm Formtiefe alle Formen von den männlichen Probanden wahrgenommen werden, während bei PVC und Aluminium hierfür nur 0,1 mm Formtiefe notwendig sind. Die minimal benötigte Formgröße für eine Formwahrnehmung von 100% beträgt bei Silikon 4 mm, bei PVC 3 mm und bei Aluminium 2 mm. Lediglich bei Aluminium nimmt die benötigte Größe der Quadrate für eine Wahrnehmung durch alle Probanden mit zunehmender Formtiefe ab. Bei PVC ist die hierfür benötigte Formgröße bei allen drei Formtiefen identisch.

Dreiecke werden bei allen Materialien und Formtiefen von allen männlichen Probanden wahrgenommen. Die hierfür mindestens benötigte Formgröße ist jedoch je nach Material und Formtiefe unterschiedlich. Bei Silikon ist die minimal benötigte Formgröße für eine 100%-ige Wahrnehmung der Dreiecke durch alle männlichen

Probanden 4 mm. Bei PVC ist diese von der Tiefe unabhängig und beträgt in allen Fällen 5 mm. Bei Aluminium sind mindestens 4 mm Formgröße für 100% Formwahrnehmung notwendig.

Tabelle 3-45: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	3	15%	15%	4	20%	20%	3	15%	15%
		2	6	30%	45%	9	45%	65%	9	45%	60%
		3	8	40%	85%	5	25%	90%	7	35%	95%
		4	1	5%	90%	2	10%	100%	0	0%	95%
		5	2	10%	100%	-	-	-	1	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	5	25%	25%	2	10%	10%	3	15%	15%
		2	7	35%	60%	13	65%	75%	12	60%	75%
		3	4	20%	80%	4	20%	95%	4	20%	95%
		4	2	10%	90%	1	5%	100%	1	5%	100%
		5	1	5%	95%	-	-	-	-	-	-
		6	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	6	30%	30%	1	5%	5%	2	10%	10%
		2	2	10%	40%	5	25%	30%	7	35%	45%
		3	8	40%	80%	5	25%	55%	6	30%	75%
		4	1	5%	85%	5	25%	80%	5	25%	100%
		5	1	5%	90%	3	15%	95%	-	-	-
		6	0	0%	90%	1	5%	100%	-	-	-
		7	2	10%	100%	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PVC	Kreis	1	1	5%	5%	1	5%	5%	2	10%	10%
		2	13	65%	70%	12	60%	65%	10	50%	60%
		3	4	20%	90%	3	15%	80%	8	40%	100%
		4	2	10%	100%	4	20%	100%	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-45: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20) (forts.)

PVC	Quadrat	1	3	15%	15%	0	0%	0%	3	15%	15%
		2	12	60%	75%	18	90%	90%	12	60%	75%
		3	5	25%	100%	2	10%	100%	5	25%	100%
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	5	25%	25%	3	15%	15%	11	55%	55%
		3	10	50%	75%	13	65%	80%	4	20%	75%
		4	3	15%	90%	2	10%	90%	3	15%	90%
		5	2	10%	100%	2	10%	100%	2	10%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	3	15%	15%	5	25%	25%
		2	11	55%	55%	11	55%	70%	13	65%	90%
		3	9	45%	100%	5	25%	95%	1	5%	95%
		4	-	-	-	1	5%	100%	0	0%	95%
		5	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	1	5%	5%	5	25%	25%	6	30%	30%
		2	15	75%	80%	11	55%	80%	14	70%	100%
		3	3	15%	95%	4	20%	100%	-	-	-
		4	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	8	40%	40%	5	25%	25%	19	95%	95%
		3	8	40%	80%	11	55%	80%	0	0%	95%
		4	2	10%	90%	4	20%	100%	1	5%	100%
		5	2	10%	100%	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

In Tabelle 3-46 sind die Ergebnisse für die Formwahrnehmung durch die weibliche Probanden dargestellt. Bei Silikon werden mindestens 0,3 mm Formtiefe, bei den beiden anderen Materialien nur 0,1 mm Formtiefe für eine Wahrnehmung der Kreise durch alle weiblichen Probanden benötigt. Bei PVC ist die hierfür benötigte Formgröße unabhängig von der Formtiefe und beträgt 4 mm. Bei Silikon beträgt sie 5 mm und bei Aluminium ist sie mit 2 mm am geringsten.

Für die Quadrate gilt bezüglich der Formtiefe gleiches wie bei den Kreisen. Bei Silikon nimmt die benötigte Formgröße für eine 100%-ige Wahrnehmung mit steigender Formtiefe ab. Sie beträgt mindestens 5 mm. Bei PVC werden hierfür mindestens 3 mm, bei Aluminium 2 mm benötigt.

Auch bei den Dreiecken, wie bei Kreisen und Quadraten, werden bei Silikon 0,3 mm und bei PVC und Aluminium 0,1 mm Formtiefe für eine Formwahrnehmung durch alle weiblichen Probanden benötigt. Für Silikon nimmt die hierfür benötigte Formgröße mit zunehmender Formtiefe stetig ab und beträgt mindestens 5 mm. Bei PVC und Aluminium werden für 100% Wahrnehmung der Dreiecke durch die weiblichen Probanden mindestens 4 mm Formgröße benötigt.

Tabelle 3-46: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	5	25%	25%	5	25%	25%	6	30%	30%
		2	8	40%	65%	7	35%	60%	9	45%	75%
		3	3	15%	80%	3	15%	75%	2	10%	85%
		4	3	15%	95%	2	10%	85%	2	10%	95%
		5	0	0%	95%	3	15%	100%	0	0%	95%
		6	0	0%	95%	-	-	-	1	5%	100%
		7	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	9	45%	45%	7	35%	35%	5	25%	25%
		2	8	40%	85%	9	45%	80%	8	40%	65%
		3	1	5%	90%	3	15%	95%	5	25%	90%
		4	1	5%	95%	0	0%	95%	1	5%	95%
		5	0	0%	95%	0	0%	95%	1	5%	100%
		6	0	0%	95%	0	0%	95%	-	-	-
		7	0	0%	95%	0	0%	95%	-	-	-
		8	0	0%	95%	1	5%	100%	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-46: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20) (forts.)

Silikon	Dreieck	1	5	25%	25%	4	20%	20%	1	5%	5%
		2	7	35%	60%	8	40%	60%	10	50%	55%
		3	5	25%	85%	5	25%	85%	6	30%	85%
		4	1	5%	90%	2	10%	95%	2	10%	95%
		5	0	0%	90%	0	0%	95%	1	5%	100%
		6	0	0%	90%	0	0%	95%	-	-	-
		7	1	5%	95%	1	5%	100%	-	-	-
		8	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
PVC	Kreis	1	2	10%	10%	3	15%	15%	2	10%	10%
		2	13	65%	75%	12	60%	75%	12	60%	70%
		3	3	15%	90%	4	20%	95%	5	25%	95%
		4	2	10%	100%	1	5%	100%	1	5%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	2	10%	10%	2	10%	10%	1	5%	5%
		2	11	55%	65%	15	75%	85%	14	70%	75%
		3	7	35%	100%	3	15%	100%	4	20%	95%
		4	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	5	25%	25%	7	35%	35%	8	40%	40%
		3	12	60%	85%	10	50%	85%	8	40%	80%
		4	3	15%	100%	2	10%	95%	4	20%	100%
		5	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	1	5%	5%	8	40%	40%	8	40%	40%
		2	13	65%	70%	10	50%	90%	12	60%	100%
		3	5	25%	95%	1	5%	95%	-	-	-
		4	1	5%	100%	1	5%	100%	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-46: Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20) (forts.)

Aluminium	Quadrat	1	2	10%	10%	8	40%	40%	8	40%	40%
		2	14	70%	80%	10	50%	90%	12	60%	100%
		3	4	20%	100%	2	10%	100%	-	-	-
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	8	40%	40%	11	55%	55%	17	85%	85%
		3	9	45%	85%	6	30%	85%	2	10%	95%
		4	3	15%	100%	2	10%	95%	0	0%	95%
		5	-	-	-	1	5%	100%	1	5%	100%
		6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe

Im Anschluss erfolgte die Auswertung der erkannten Formen für die unterschiedlichen Materialien. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-47 dargestellt. Insgesamt wird bei der Betrachtung der Formerkennung für die Kreise deutlich, dass eine 100%-ige Erkennung nur bei PVC und Aluminium möglich ist. Bei PVC werden die Kreise von allen Probanden nur bei 0,5 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße erkannt, bei Aluminium bei 0,3 mm und 0,5 mm Formgröße jeweils bei 8 mm Formgröße. Insgesamt ist unter 3 mm Formgröße bei keiner Formtiefe und keinem Material eine Formerkennung möglich.

Tabelle 3-47: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	3%	3%	1	3%	3%	5	13%	13%
		4	2	5%	8%	8	20%	23%	7	18%	30%
		5	3	8%	15%	10	25%	48%	16	40%	70%
		6	6	15%	30%	7	18%	65%	5	13%	83%
		7	5	13%	43%	4	10%	75%	4	10%	93%
		8	5	13%	55%	6	15%	90%	0	0%	93%
		9	4	10%	65%	2	5%	95%	1	3%	95%
		10	4	10%	75%	1	3%	98%	0	0%	95%



Tabelle 3-47: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) (forts.)

Silikon	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	2	5%	5%	1	3%	3%
		4	2	5%	5%	8	20%	25%	5	13%	15%
		5	4	10%	15%	6	15%	40%	12	30%	45%
		6	8	20%	35%	8	20%	60%	9	23%	68%
		7	4	10%	45%	6	15%	75%	7	18%	85%
		8	4	10%	55%	4	10%	85%	4	10%	95%
		9	6	15%	70%	3	8%	93%	0	0%	95%
		10	4	10%	80%	0	0%	93%	0	0%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	3%	3%
		4	0	0%	0%	2	5%	5%	4	10%	13%
		5	2	5%	5%	12	30%	35%	5	13%	25%
		6	4	10%	15%	8	20%	55%	12	30%	55%
		7	6	15%	30%	7	18%	73%	10	25%	80%
		8	6	15%	45%	3	8%	80%	4	10%	90%
		9	4	10%	55%	6	15%	95%	1	3%	93%
		10	2	5%	60%	0	0%	95%	2	5%	98%
PVC	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	3%	3%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	3	8%	10%	4	10%	10%	7	18%	18%
		5	11	28%	38%	15	38%	48%	13	33%	50%
		6	7	18%	55%	13	33%	80%	12	30%	80%
		7	10	25%	80%	4	10%	90%	5	13%	93%
		8	5	13%	93%	2	5%	95%	2	5%	98%
		9	2	5%	98%	1	3%	98%	0	0%	98%
		10	0	0%	98%	0	0%	98%	1	3%	100%
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	2	5%	5%	1	3%	3%
		4	7	18%	18%	10	25%	30%	6	15%	18%
		5	15	38%	55%	13	33%	63%	15	38%	55%
		6	9	23%	78%	8	20%	83%	10	25%	80%
		7	4	10%	88%	2	5%	88%	5	13%	93%
		8	4	10%	98%	3	8%	95%	0	0%	93%
		9	0	0%	98%	0	0%	95%	1	3%	95%
		10	0	0%	98%	1	3%	98%	1	3%	98%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	1	3%	3%	2	5%	5%	3	8%	8%
		5	8	20%	23%	6	15%	20%	8	20%	28%
		6	14	35%	58%	20	50%	70%	15	38%	65%
		7	5	13%	70%	6	15%	85%	6	15%	80%
		8	5	13%	83%	3	8%	93%	3	8%	88%
		9	3	8%	90%	1	3%	95%	3	8%	95%
		10	3	8%	98%	1	3%	98%	2	5%	100%

Tabelle 3-47: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) (forts.)

Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	3%	3%	1	3%	3%	1	3%	3%
		4	6	15%	18%	6	15%	18%	6	15%	18%
		5	9	23%	40%	14	35%	53%	13	33%	50%
		6	15	38%	78%	9	23%	75%	12	30%	80%
		7	5	13%	90%	5	13%	88%	5	13%	93%
		8	2	5%	95%	5	13%	100%	3	8%	100%
		9	1	3%	98%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	98%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	3	8%	8%	3	8%	8%
		4	7	18%	18%	7	18%	25%	7	18%	25%
		5	14	35%	53%	17	43%	68%	13	33%	58%
		6	12	30%	83%	9	23%	90%	8	20%	78%
		7	3	8%	90%	2	5%	95%	6	15%	93%
		8	2	5%	95%	1	3%	98%	1	3%	95%
		9	1	3%	98%	0	0%	98%	2	5%	100%
		10	0	0%	98%	1	3%	100%	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	3%	3%	0	0%	0%	2	5%	5%
		4	1	3%	5%	3	8%	8%	5	13%	18%
		5	11	28%	33%	12	30%	38%	9	23%	40%
		6	11	28%	60%	9	23%	60%	17	43%	83%
		7	8	20%	80%	8	20%	80%	5	13%	95%
		8	5	13%	93%	5	13%	93%	2	5%	100%
		9	1	3%	95%	2	5%	98%	-	-	-
		10	0	0%	95%	1	3%	100%	-	-	-

Für die Quadrate zeigt sich nur bei Aluminium eine Formerkennung durch alle Probanden. Hierfür sind mindestens 0,3 mm Formtiefe und 9 mm Formgröße nötig. Auch hier werden bei allen Materialien mindestens 3 mm Formgröße für eine Formerkennung benötigt.

Bei den Dreiecken erfolgt sowohl für PVC als auch für Aluminium eine Formerkennung durch alle Probanden. Bei Aluminium sind hierfür 0,3 mm, bei PVC 0,5 mm Formtiefe nötig. Dabei muss die Formgröße 10 mm bzw. 8 mm betragen. Während bei Silikon und Aluminium ab 3 mm Formgröße eine Formerkennung möglich ist werden dafür bei PVC mindestens 4 mm Formgröße benötigt.

### Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe nach Alter

Im Folgenden wird auf die erkannten Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und zwar für die untersuchten Altersgruppen <40 Jahre und  $\geq 40$  Jahre. Die Altersgruppen an sich werden dabei

nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.4.3 A.1.1 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Altersgruppen gegenübergestellt werden.

Bei der Betrachtung der Formerkennung durch die Probanden unter 40 Jahre zeigt sich, dass bei allen Materialien eine Formerkennung der Kreise durch alle Probanden möglich ist (vgl. Tabelle 3-48). Bei PVC sind dafür mindestens 0,3 mm Formtiefe notwendig, bei PVC und Aluminium sind 0,2 mm Formtiefe ausreichend. Bei Silikon und PVC zeigt sich insgesamt eine Abnahme der benötigten Formgröße für eine Erkennung der Kreise durch alle Probanden mit zunehmender Formtiefe. Bei Aluminium und Silikon ist eine Erkennung der Kreise für Probanden unter 40 Jahre ab 3 mm, bei PVC ab 4 mm Formgröße möglich.

Bei den Quadranten erfolgt bei Silikon eine Erkennung der Form durch alle Probanden nur bei 0,3 mm Formtiefe und 8 mm Formgröße. Bei PVC und Aluminium können bei allen Formtiefen alle Probanden unter 40 Jahre die Quadrate als solche erkennen. Dafür sind bei PVC mindestens 7 mm und bei Aluminium mindestens 6 mm Formgröße notwendig. Unter 3 mm Formgröße erfolgt bei keinem der Materialien eine Erkennung der Quadrate.

Bei den Dreiecken ist bei allen Materialien eine Erkennung durch alle Probanden möglich. Bei Silikon ist hierfür eine Tiefe von mindestens 0,3 mm, bei PVC und Aluminium von 0,1 mm notwendig. Bei Silikon und Aluminium nimmt die benötigte Formgröße für eine Erkennung der Dreiecke durch alle Probanden mit zunehmender Formtiefe ab. Bei Silikon und PVC sind 4 mm, bei Aluminium 3 mm Formgröße für eine Formerkennung nötig.

Tabelle 3-48: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden <40 Jahre (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	1	5%	5%	2	10%	10%
		4	1	5%	10%	6	30%	35%	3	15%	25%
		5	3	15%	25%	5	25%	60%	11	55%	80%
		6	3	15%	40%	5	25%	85%	2	10%	90%
		7	2	10%	50%	1	5%	90%	2	10%	100%
		8	3	15%	65%	1	5%	95%	-	-	-
		9	3	15%	80%	0	0%	95%	-	-	-
		10	3	15%	95%	1	5%	100%	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	0	0%	0%
		4	2	10%	10%	5	25%	30%	2	10%	10%
		5	2	10%	20%	3	15%	45%	7	35%	45%
		6	5	25%	45%	6	30%	75%	5	25%	70%
		7	3	15%	60%	4	20%	95%	4	20%	90%
		8	1	5%	65%	1	5%	100%	1	5%	95%
		9	3	15%	80%	-	-	-	0	0%	95%
		10	2	10%	90%	-	-	-	0	0%	95%

Tabelle 3-48: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &lt;40 Jahre (N=20) (forts.)

Silikon	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	0%	1	5%	5%	2	10%	10%
		5	0	0%	0%	8	40%	45%	4	20%	30%
		6	4	20%	20%	7	35%	80%	9	45%	75%
		7	6	30%	50%	3	15%	95%	2	10%	85%
		8	3	15%	65%	0	0%	95%	3	15%	100%
		9	1	5%	70%	1	5%	100%	-	-	-
		10	2	10%	80%	-	-	-	-	-	-
PVC	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	1	5%	5%	3	15%	15%	4	20%	20%
		5	8	40%	45%	9	45%	60%	9	45%	65%
		6	4	20%	65%	6	30%	90%	7	35%	100%
		7	7	35%	100%	2	10%	100%	-	-	-
		8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	1	5%	5%
		4	4	20%	20%	5	25%	30%	3	15%	20%
		5	10	50%	70%	9	45%	75%	10	50%	70%
		6	4	20%	90%	4	20%	95%	4	20%	90%
		7	0	0%	90%	1	5%	100%	2	10%	100%
		8	2	10%	100%	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	1	5%	5%	1	5%	5%	0	0%	0%
		5	5	25%	30%	3	15%	20%	7	35%	35%
		6	10	50%	80%	13	65%	85%	10	50%	85%
		7	4	20%	100%	2	10%	95%	3	15%	100%
		8	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	4	20%	20%	4	20%	20%	2	10%	15%
		5	7	35%	55%	12	60%	80%	8	40%	55%
		6	8	40%	95%	4	20%	100%	8	40%	95%
		7	0	0%	95%	-	-	-	1	5%	100%
		8	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-48: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden <40 Jahre (N=20) (forts.)

Aluminium	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	1	5%	5%
		4	5	25%	25%	2	10%	15%	3	15%	20%
		5	9	45%	70%	13	65%	80%	9	45%	65%
		6	3	15%	85%	4	20%	100%	3	15%	80%
		7	1	5%	90%	-	-	-	4	20%	100%
		8	1	5%	95%	-	-	-	-	-	-
		9	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	0	0%	5%	2	10%	10%	3	15%	20%
		5	10	50%	55%	8	40%	50%	2	10%	30%
		6	7	35%	90%	6	30%	80%	13	65%	95%
		7	1	5%	95%	4	20%	100%	1	5%	100%
		8	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse der Auswertung der erkannten Formen für die über 40 Jahre alten Probanden sind in Tabelle 3-49 dargestellt. Bei den Kreisen ist für Silikon keine Formerkennung bei allen Probanden möglich. Bei PVC können nur bei 0,5 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße alle Kreise von den Probanden erkannt werden. Bei Aluminium sind hierfür 8 mm Formgröße bei 0,3 mm und 0,5 mm Formtiefe nötig. Bei allen Materialien ist eine Erkennung der Kreise durch die über 40 Jahre alten Probanden erst ab 3 mm Formgröße möglich.

Auch für die Quadrate können die ersten der über 40 Jahre alten Probanden bei allen Materialien erst ab 3 mm Formgröße die Form erkennen. Nur bei Aluminium kommt es zu einer Erkennung der Quadrate durch alle Probanden. Hierfür sind 0,3 mm Tiefe bei 10 mm Formgröße bzw. 0,5 mm Tiefe bei 9 mm Formgröße nötig.

Bei den Dreiecken fällt bei Silikon auf, dass bei 0,1 mm Formtiefe nicht einmal die Hälfte der Probanden über 40 Jahre die Form erkennen können. Insgesamt können auch bei den anderen Formtiefen nicht alle Dreiecke in Silikon von den Probanden erkannt werden. Zur Erkennung der Dreiecke durch alle Probanden sind bei PVC 0,5 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße nötig, bei Aluminium 0,3 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße oder 0,5 mm Formtiefe bei 8 mm Formgröße. Dreiecke können von den Probanden über 40 Jahre bei Silikon und Aluminium ab 3 mm, bei PVC ab 4 mm Formgröße erkannt werden.

Tabelle 3-49: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &gt;40 Jahre (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	3	15%	15%
		4	1	5%	5%	2	10%	10%	4	20%	35%
		5	0	0%	5%	5	25%	35%	5	25%	60%
		6	3	15%	20%	2	10%	45%	3	15%	75%
		7	3	15%	35%	3	15%	60%	2	10%	85%
		8	2	10%	45%	5	25%	85%	0	0%	85%
		9	1	5%	50%	2	10%	95%	1	5%	90%
		10	1	5%	55%	0	0%	95%	0	0%	90%
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	1	5%	5%
		4	0	0%	0%	3	15%	20%	3	15%	20%
		5	2	10%	10%	3	15%	35%	5	25%	45%
		6	3	15%	25%	2	10%	45%	4	20%	65%
		7	1	5%	30%	2	10%	55%	3	15%	80%
		8	3	15%	45%	3	15%	70%	3	15%	95%
		9	3	15%	60%	3	15%	85%	0	0%	95%
		10	2	10%	70%	0	0%	85%	0	0%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	0	0%	0%	1	5%	5%	2	10%	15%
		5	2	10%	10%	4	20%	25%	1	5%	20%
		6	0	0%	10%	1	5%	30%	3	15%	35%
		7	0	0%	10%	4	20%	50%	8	40%	75%
		8	3	15%	25%	3	15%	65%	1	5%	80%
		9	3	15%	40%	5	25%	90%	1	5%	85%
		10	0	0%	40%	0	0%	90%	2	10%	95%
PVC	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	2	10%	15%	1	5%	5%	3	15%	15%
		5	3	15%	30%	6	30%	35%	4	20%	35%
		6	3	15%	45%	7	35%	70%	5	25%	60%
		7	3	15%	60%	2	10%	80%	5	25%	85%
		8	5	25%	85%	2	10%	90%	2	10%	95%
		9	2	10%	95%	1	5%	95%	0	0%	95%
		10	0	0%	95%	0	0%	95%	1	5%	100%

Tabelle 3-49: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden &gt;40 Jahre (N=20) (forts.)

PVC	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	0	0%	0%
		4	3	15%	15%	5	25%	30%	3	15%	15%
		5	5	25%	40%	4	20%	50%	5	25%	40%
		6	5	25%	65%	4	20%	70%	6	30%	70%
		7	4	20%	85%	1	5%	75%	3	15%	85%
		8	2	10%	95%	3	15%	90%	0	0%	85%
		9	0	0%	95%	0	0%	90%	1	5%	90%
		10	0	0%	95%	1	5%	95%	1	5%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	0%	1	5%	5%	3	15%	15%
		5	3	15%	15%	3	15%	20%	1	5%	20%
		6	4	20%	35%	7	35%	55%	5	25%	45%
		7	1	5%	40%	4	20%	75%	3	15%	60%
		8	5	25%	65%	2	10%	85%	3	15%	75%
		9	3	15%	80%	1	5%	90%	3	15%	90%
		10	3	15%	95%	1	5%	95%	2	10%	100%
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	1	5%	5%	0	0%	0%
		4	2	10%	15%	2	10%	15%	4	20%	20%
		5	2	10%	25%	2	10%	25%	5	25%	45%
		6	7	35%	60%	5	25%	50%	4	20%	65%
		7	5	25%	85%	5	25%	75%	4	20%	85%
		8	1	5%	90%	5	25%	100%	3	15%	100%
		9	1	5%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	2	10%	10%	2	10%	10%
		4	2	10%	10%	5	25%	35%	4	20%	30%
		5	5	25%	35%	4	20%	55%	4	20%	50%
		6	9	45%	80%	5	25%	80%	5	25%	75%
		7	2	10%	90%	2	10%	90%	2	10%	85%
		8	1	5%	95%	1	5%	95%	1	5%	90%
		9	0	0%	95%	0	0%	95%	2	10%	100%
		10	0	0%	95%	1	5%	100%	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	1	5%	5%	1	5%	5%	2	10%	15%
		5	1	5%	10%	4	20%	25%	7	35%	50%
		6	4	20%	30%	3	15%	40%	4	20%	70%
		7	7	35%	65%	4	20%	60%	4	20%	90%
		8	4	20%	85%	5	25%	85%	2	10%	100%
		9	1	5%	90%	2	10%	95%	-	-	-
		10	0	0%	90%	1	5%	100%	-	-	-

## Erkennung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe nach Geschlecht

In diesem Unterkapitel wird auf die erkannten Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe eingegangen, und getrennt für beide Geschlechter. Die Geschlechter an sich werden dabei nicht verglichen. Im Anhang in Kapitel A.4.4 sind allerdings Diagramme zu finden, bei welchen die Ergebnisse für beide Geschlechter gegenübergestellt werden.

Betrachtet man die Erkennung der Kreise bei den männlichen Probanden, so wird deutlich, dass eine Formerkennung durch alle Probanden bei allen Materialien möglich ist (siehe Tabelle 3-50). Bei Aluminium und PVC ist eine Formerkennung durch alle männlichen Probanden bei allen Formtiefen möglich, bei Silikon ab 0,3 mm Formtiefe. Bei Silikon und PVC nimmt die dafür benötigte Formgröße mit zunehmender Formtiefe ab.

Tabelle 3-50: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	1	5%	5%	1	5%	5%
		4	2	10%	15%	2	10%	15%	5	25%	30%
		5	1	5%	20%	7	35%	50%	10	50%	80%
		6	3	15%	35%	3	15%	65%	1	5%	85%
		7	1	5%	40%	4	20%	85%	3	15%	100%
		8	1	5%	45%	2	10%	95%	-	-	-
		9	2	10%	55%	0	0%	95%	-	-	-
		10	3	15%	70%	1	5%	100%	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	0%	4	20%	20%	2	10%	10%
		5	1	5%	5%	4	20%	40%	8	40%	50%
		6	4	20%	25%	5	25%	65%	5	25%	75%
		7	3	15%	40%	2	10%	75%	2	10%	85%
		8	3	15%	55%	4	20%	95%	2	10%	95%
		9	3	15%	70%	0	0%	95%	0	0%	95%
		10	3	15%	85%	0	0%	95%	0	0%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	0%	0	0%	0%	2	10%	10%
		5	0	0%	0%	3	15%	15%	1	5%	15%
		6	0	0%	0%	4	20%	35%	7	35%	50%
		7	4	20%	20%	6	30%	65%	6	30%	80%
		8	2	10%	30%	3	15%	80%	3	15%	95%
		9	2	10%	40%	4	20%	100%	1	5%	100%
		10	2	10%	50%	-	-	-	-	-	-



Tabelle 3-50: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20) (forts.)

PVC	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	5%	1	5%	5%	2	10%	10%
		5	5	25%	30%	8	40%	45%	5	25%	35%
		6	4	20%	50%	8	40%	85%	9	45%	80%
		7	6	30%	80%	2	10%	95%	3	15%	95%
		8	2	10%	90%	1	5%	100%	1	5%	100%
		9	2	10%	100%	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	2	10%	10%	1	5%	5%
		4	4	20%	20%	5	25%	35%	3	15%	20%
		5	7	35%	55%	7	35%	70%	8	40%	60%
		6	5	25%	80%	3	15%	85%	6	30%	90%
		7	2	10%	90%	1	5%	90%	2	10%	100%
		8	2	10%	100%	2	10%	100%	-	-	-
		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		5	2	10%	10%	4	20%	20%	5	25%	25%
		6	8	40%	50%	10	50%	70%	9	45%	70%
		7	4	20%	70%	3	15%	85%	2	10%	80%
		8	3	15%	85%	2	10%	95%	1	5%	85%
		9	2	10%	95%	1	5%	100%	3	15%	100%
		10	1	5%	100%	-	-	-	-	-	-
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	2	10%	10%	2	10%	10%	3	15%	15%
		5	6	30%	40%	3	15%	25%	4	20%	35%
		6	7	35%	75%	8	40%	65%	7	35%	70%
		7	4	20%	95%	5	25%	90%	3	15%	85%
		8	1	5%	100%	1	5%	95%	3	15%	100%
		9	-	-	-	1	5%	100%	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	2	10%	10%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	3	15%	25%	4	20%	20%	6	30%	30%
		5	8	40%	65%	6	30%	50%	7	35%	65%
		6	4	20%	85%	8	40%	90%	2	10%	75%
		7	2	10%	95%	1	5%	95%	3	15%	90%
		8	1	5%	100%	1	5%	100%	1	5%	95%
		9	-	-	-	-	-	-	1	5%	100%
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3-50: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20) (forts.)

Aluminium	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	1	5%	5%	0	0%	0%	1	5%	10%
		5	6	30%	35%	6	30%	30%	4	20%	30%
		6	3	15%	50%	4	20%	50%	10	50%	80%
		7	7	35%	85%	5	25%	75%	3	15%	95%
		8	2	10%	95%	4	20%	95%	1	5%	100%
		9	1	5%	100%	1	5%	100%	-	-	-
		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bei den Quadraten können nur bei PVC und Aluminium alle männlichen Probanden die Form erkennen. Bei PVC werden dafür mindestens 7 mm, bei Aluminium mindestens 8 mm Formgröße benötigt. Bei diesen beiden Materialien können die männlichen Probanden die Quadrate prinzipiell ab 3 mm, bei Silikon hingegen ab 4 mm Formgröße erkennen.

Dreiecke hingegen können, wie die Kreise auch, von allen Probanden bei allen Materialien erkannt werden. Auch hier werden bei Silikon dafür mindestens 0,3 mm Formtiefe benötigt während bei PVC und Aluminium 0,1 mm Formtiefe ausreichend sind. Bei allen Materialien zeigt sich der Trend, dass mit zunehmender Formtiefe eine geringere Formgröße benötigt wird, damit alle Probanden die Dreiecke erkennen können. Bei Aluminium werden die Dreiecke von den männlichen Probanden erstmals bei 3 mm, bei PVC bei 4 mm und bei Silikon bei 5 mm erkannt.

Betrachtet man die Erkennung der Kreise bei den weiblichen Probanden, so zeigen die Ergebnisse, dass nur bei PVC und Aluminium eine Erkennung durch alle Probanden möglich ist. Bei PVC sind hierfür 0,5 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße nötig, bei Aluminium erfolgt eine Erkennung aller Kreise bei 0,3 mm Formtiefe und 8 mm Größe bzw. 0,5 mm Tiefe und 7 mm Größe der Form.

Die Quadrate werden nur bei Aluminium von allen weiblichen Probanden erkannt. Hierfür sind mindestens 0,3 mm Formtiefe nötig. Bei Aluminium und Silikon werden die Quadrate den ersten weiblichen Probanden bei 3 mm, bei PVC bei 4 mm Formgröße erkannt.

Die Erkennung aller Dreiecke durch die weiblichen Probanden ist, wie bei den Kreisen, nur bei PVC und Aluminium möglich. Bei PVC werden dafür 0,5 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße benötigt, bei Aluminium 0,3 mm Formtiefe und 10 mm Formgröße, bzw. 0,5 mm Formtiefe und 8 mm Formgröße. Erste Dreiecke werden bei den weiblichen Probanden für Silikon und Aluminium bei 3 mm und bei PVC ab 4 mm Formgröße erkannt.

Tabelle 3-51: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20)

		Größe [mm]	Tiefe [mm]								
			0,1			0,3			0,5		
			Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %	Anzahl	%	kumulierte %
Silikon	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	4	20%	20%
		4	0	0%	0%	6	30%	30%	2	10%	30%
		5	2	10%	10%	3	15%	45%	6	30%	60%
		6	3	15%	25%	4	20%	65%	4	20%	80%
		7	4	20%	45%	0	0%	65%	1	5%	85%
		8	4	20%	65%	4	20%	85%	0	0%	85%
		9	2	10%	75%	2	10%	95%	1	5%	90%
		10	1	5%	80%	0	0%	95%	0	0%	90%
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	2	10%	10%	1	5%	5%
		4	2	10%	10%	4	20%	30%	3	15%	20%
		5	3	15%	25%	2	10%	40%	4	20%	40%
		6	4	20%	45%	3	15%	55%	4	20%	60%
		7	1	5%	50%	4	20%	75%	5	25%	85%
		8	1	5%	55%	0	0%	75%	2	10%	95%
		9	3	15%	70%	3	15%	90%	0	0%	95%
		10	1	5%	75%	0	0%	90%	0	0%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	0	0%	0%	2	10%	10%	2	10%	15%
		5	2	10%	10%	9	45%	55%	4	20%	35%
		6	4	20%	30%	4	20%	75%	5	25%	60%
		7	2	10%	40%	1	5%	80%	4	20%	80%
		8	4	20%	60%	0	0%	80%	1	5%	85%
		9	2	10%	70%	2	10%	90%	0	0%	85%
		10	0	0%	70%	0	0%	90%	2	10%	95%
PVC	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	3	15%	15%	3	15%	15%	5	25%	25%
		5	6	30%	45%	7	35%	50%	8	40%	65%
		6	3	15%	60%	5	25%	75%	3	15%	80%
		7	4	20%	80%	2	10%	85%	2	10%	90%
		8	3	15%	95%	1	5%	90%	1	5%	95%
		9	0	0%	95%	1	5%	95%	0	0%	95%
		10	0	0%	95%	0	0%	95%	1	5%	100%

Tabelle 3-51: Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20) (forts.)

PVC	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	3	15%	15%	5	25%	25%	3	15%	15%
		5	8	40%	55%	6	30%	55%	7	35%	50%
		6	4	20%	75%	5	25%	80%	4	20%	70%
		7	2	10%	85%	1	5%	85%	3	15%	85%
		8	2	10%	95%	1	5%	90%	0	0%	85%
		9	0	0%	95%	0	0%	90%	1	5%	90%
		10	0	0%	95%	1	5%	95%	1	5%	95%
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		4	1	5%	5%	2	10%	10%	3	15%	15%
		5	6	30%	35%	2	10%	20%	3	15%	30%
		6	6	30%	65%	10	50%	70%	6	30%	60%
		7	1	5%	70%	3	15%	85%	4	20%	80%
		8	2	10%	80%	1	5%	90%	2	10%	90%
		9	1	5%	85%	0	0%	90%	0	0%	90%
		10	2	10%	95%	1	5%	95%	2	10%	100%
Aluminium	Kreis	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	1	5%	5%	1	5%	5%
		4	4	20%	25%	4	20%	25%	3	15%	20%
		5	6	30%	55%	8	40%	65%	9	45%	65%
		6	7	35%	90%	2	10%	75%	5	25%	90%
		7	0	0%	90%	1	5%	80%	2	10%	100%
		8	1	5%	95%	4	20%	100%	-	-	-
		9	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
		10	0	0%	95%	-	-	-	-	-	-
	Quadrat	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	0	0%	0%	1	5%	5%	3	15%	15%
		4	3	15%	15%	4	20%	25%	1	5%	20%
		5	8	40%	55%	9	45%	70%	6	30%	50%
		6	4	20%	75%	5	25%	95%	6	30%	80%
		7	2	10%	85%	0	0%	95%	3	15%	95%
		8	1	5%	90%	0	0%	95%	0	0%	95%
		9	1	5%	95%	0	0%	95%	1	5%	100%
		10	0	0%	95%	1	5%	100%	-	-	-
	Dreieck	1	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		2	0	0%	0%	0	0%	0%	0	0%	0%
		3	1	5%	5%	0	0%	0%	1	5%	5%
		4	1	5%	10%	2	10%	10%	4	20%	25%
		5	5	25%	35%	6	30%	40%	5	25%	50%
		6	7	35%	70%	6	30%	70%	7	35%	85%
		7	3	15%	85%	1	5%	75%	2	10%	95%
		8	1	5%	90%	3	15%	90%	1	5%	100%
		9	0	0%	90%	1	5%	95%	-	-	-
		10	0	0%	90%	1	5%	100%	-	-	-

---

### 3.6.6. Diskussion der Studie 4

Die Studie liefert insgesamt erste gute Anhaltspunkte zur Wahrnehmung und Erkennung konkaver Formen bei unterschiedlichen Materialien. Jedoch unterliegt auch diese Studie einigen Restriktionen.

Die Zeit, welche den Probanden zur Verfügung stand, war in dieser Versuchsreihe nicht limitiert. Somit lagen die Versuchszeiten zwischen 30 min und 2 h. Hierdurch ist es möglich, dass, abhängig von der Versuchszeit, bei den Probanden unterschiedlich starke geistige Ermüdungseffekte aufgetreten sind, welche die Leistungsfähigkeit beeinflussten. Jedoch könnte eine längere Versuchszeit sich auch in stärkeren Trainingseffekten auswirken, was die Ergebnisse zum Positiven hin verändert haben könnte. Ob einer der Effekte auftrat, lässt sich jedoch weder bestätigen noch ausschließen. Versuchszeiten sollten daher zukünftig limitiert werden.

Die Wahrnehmungsraten waren bei 0,1 mm durchweg sehr hoch. Es ist daher anzunehmen, dass die eigentliche Wahrnehmungsgrenze deutlich niedriger liegt. Bei zukünftigen Versuchen sollen daher, sofern technisch möglich, geringere Formtiefen mit einbezogen werden.

Darüber hinaus wurden in diesem Versuch nur drei Materialien untersucht, welche sich in verschiedenen Parametern unterscheiden. Eine detailliertere Untersuchung weiterer Materialien erscheint sinnvoll. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass sich diese möglichst immer nur in einem Parameter unterscheiden, nicht in mehreren. So wäre es beispielsweise sinnvoll, ein Material mit gleichem Härtegrad, aber anderem Reibbeiwert wie Silikon zu wählen, um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit näher zu untersuchen.

Die Anzahl der Formen war in diesem Versuch auf drei Formen beschränkt. Hierdurch lag die Wahrscheinlichkeit, dass die richtige Form erraten und nicht ertastet wird, bereits bei 33 %. Zwar wurden die Probanden gebeten, nur eine Form anzugeben, wenn sie sich sicher waren, diese erkannt zu haben, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Probanden geraten haben. Um die Wahrscheinlichkeit eines Erratens einer richtigen Form zu vermeiden, sollten zukünftig gegebenenfalls mehr Formen in die Untersuchung einbezogen werden.

---

#### **4. Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die taktile Wahrnehmung**

---

In Kapitel 3 wurden die Ergebnisse zu den einzelnen Studien dargestellt. Bei den Studien 1, 2 und 4 erfolgte dabei die Betrachtung der einzelnen Formen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse jeweils für unterschiedliche Altersgruppen und männliche und weibliche Probanden betrachtet. Ebenso wurde jeweils zwischen der Wahrnehmung und Erkennung der Formen unterschieden. Es wurde jedoch bisher nicht untersucht ob diese einzelnen Parameter einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung haben und ob es signifikante Unterschiede bei der Wahrnehmung und Erkennung der Formen gab. Dies ist das Ziel dieses Kapitels. Konkret sollen hier die folgenden Punkte untersucht werden:

- Unterschiede bei Wahrnehmung und Erkennung der Formen
- Unterschiede zw. Geschlechtern
- Unterschiede zwischen Altersgruppen
- Unterschiede zwischen den Formen
- Unterschiede bei den Materialien
- Formtiefe vs. Formgröße

---

#### 4.1. Vorgehen bei der statistischen Auswertung

Für die statistische Auswertung bezüglich der Unterschiede bei Formwahrnehmung und –erkennung und bei der Untersuchung der Einflussgrößen Alter und Geschlecht wurden die Daten der Studien 1 und 4 zusammengeführt, ebenso wie für die Untersuchung der Formeinflusses. Gleiches gilt für die Untersuchung des Einflusses der Formgröße vs. Formtiefe. Ziel war es dadurch eine größere Menge an Datenpunkten für die Auswertung zu haben. Eine Zusammenführung der Daten war möglich, da beide Versuche nach dem gleichen Versuchskonzept durchgeführt wurden. Dabei wurden aus Studie 1 nur die Daten der 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm tiefen Formen verwendet, da nur diese Formtiefen in Studie 4 untersucht wurden. Aus Studie 4 wurden nur die Daten der abgetasteten Silikonformen verwendet. Dadurch stand für die statistische Auswertung ein Probandenkollektiv von 71 Probanden zur Verfügung. 35 der Probanden waren weiblich und 36 männlich. Die Probanden wurden in die Altersgruppen unter 40 Jahre und 40 Jahre und älter eingeteilt. 42 der Probanden waren unter 40 Jahre alt (Mittelwert 25,5 Jahre, Standardabweichung 2,6 Jahre), 29 lagen in der Altersgruppe 40 Jahre und älter (Mittelwert 55,2 Jahre, Standardabweichung 8,9 Jahre).

Da die Prüfung auf Normalverteilung mittels des Lilliefors-Tests keine Normalverteilung der Daten zeigte, wurde sich für die statistische Auswertung für nichtparametrische Tests entschieden. Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede wurde ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Der Chi-Quadrat-Test vergleicht auftretende Häufigkeiten zwischen den zu untersuchenden Gruppen. Eine Randbedingung des Chi-Quadrat-Tests ist es, dass die erwartete Häufigkeit in nicht mehr als 20% der Fälle kleiner als 5 sein darf, damit die Ergebnisse valide sind (Bortz, 2005). Sofern diese Bedingung verletzt wurde, wurde bei zwei Stichproben ein Mann-Whitney-U-Test zur Untersuchung signifikanter Unterschiede hinsichtlich der Mediane durchgeführt (Bortz, 2005). Dies war möglich, da die untersuchten Stichproben unabhängig waren. Bei mehr als zwei Stichproben wurde ein Kruskal-Wallis-H-Test zur Untersuchung der Mediane hinsichtlich statistischer Signifikanz verwendet. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Formgröße oder die Formtiefe einen größeren Einfluss auf die Formerkennung bzw. –wahrnehmung hat. Hierfür wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Als Signifikanzwert wurde auf Basis von Bortz, 2005 ein Wert von  $p < 0,05$  festgelegt.

## 4.2. Einfluss der Form

Für die Untersuchung ob es einen Unterschied bei der Formwahrnehmung und –Erkennung zwischen den einzelnen Formen gibt wurden im Vorfeld die Mediane und Standardabweichungen für die Formtiefen berechnet. Diese sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Bei der Formwahrnehmung sind die Mediane für alle Formen und Tiefen identisch. Bei der Formerkennung ergeben sich Unterschiede bei den Medianen. So sind die Mediane von Kreisen und Quadraten bei 0,3 mm identisch und mit 5 mm geringer als für Dreiecke (6 mm). Bei 0,5 mm Formtiefe sind die Mediane von Quadraten und Dreiecken mit 6 mm identisch und der Median von Kreisen mit 5 mm geringer.

Tabelle 4-1: Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für Kreise, Quadrate und Dreiecke

		Tiefe [mm]					
		0,1		0,3		0,5	
		Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]
wahrgenommen	Kreise	2	1,27	2	1,14	2	1,07
	Quadrate	2	1,20	2	1,02	2	0,92
	Dreiecke	3	1,67	2	1,29	2	1,03
erkannt	Kreise	7	2,02	5	1,78	5	1,33
	Quadrate	7	1,97	5	1,72	6	1,32
	Dreiecke	7	1,74	6	1,62	6	1,71

Die Ergebnisse des im Anschluss durchgeführten Kruskal-Wallis-Tests zur Untersuchung des Formeinflusses auf Formwahrnehmung und –erkennung sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Es zeigen sich nur für die Formwahrnehmung bei 0,3 mm Formtiefe und für die Formerkennung bei 0,5 mm Formtiefe signifikante Unterschiede zwischen den Formen.

Tabelle 4-2: Ergebnisse Kruskal-Wallis-Test für Untersuchung des Formeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung

	Tiefe [mm]		
	0,1	0,3	0,5
p wahrgenommen	,112	,010*	,110
p erkannt	,092	,246	,002*

Im weiteren Vorgehen wird bei den Auswertungen nicht weiter zwischen den Formen unterschieden. Zum Einen, da es nur in zwei Fällen einen signifikanten Unterschied zwischen den Formen gab, zum Anderen, weil die Fallzahlen sonst für eine statistische Auswertung zu gering waren.



### 4.3. Wahrnehmung und Erkennung der Form

Zur Überprüfung, ob es signifikante Unterschiede bei der Formwahrnehmung und Formerkennung gibt, wurden im ersten Schritt die Anzahl wahrgenommener und erkannter Formen in Abhängigkeit von Formgröße und Formtiefe erfasst (siehe Tabelle 4-3). Dabei wurden, wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, die Daten aus den Studien 1 und 4 zusammengeführt. So ergeben sich bei 71 Probanden und 3 Formen je Spalte in der Tabelle 213 Datenpunkte. Dabei werden bei jeder Formgröße nur die Anzahl der neu erkannten bzw. neu wahrgenommenen Formen aufgetragen. Insgesamt fällt hierbei auf, dass unabhängig von der Formtiefe kleinere Formgrößen für die Formwahrnehmung als für die Formerkennung ausreichend sind. Auch ist die Anzahl nicht wahrgenommener Formen bei jeder Formtiefe immer geringer als die Anzahl nicht erkannter Formen.

Tabelle 4-3: Anzahl wahrgenommener und erkannter Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe

Formgröße [mm]	Tiefe [mm]					
	0,1		0,3		0,5	
	wahrgenom- men	erkannt	wahrgenom- men	erkannt	wahrgenom- men	erkannt
1	47	0	40	0	56	0
2	63	1	101	2	89	2
3	54	4	45	11	45	11
4	24	7	14	36	18	33
5	15	12	8	40	4	50
6	0	24	3	40	1	45
7	3	19	1	27	0	33
8	1	19	1	21	0	13
9	1	19	0	11	0	3
10	0	12	0	3	0	3
nicht wahrgenommen / erkannt	5	96	0	22	0	20

Für die Untersuchung der Unterschiede zwischen Formwahrnehmung und Erkennung wurde ein Chi-Quadrat-Test nach Pearson durchgeführt. Für alle untersuchten Tiefen ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen Formwahrnehmung und –erkennung ( $p \leq 0,001$ ). In Kombination mit der Betrachtung der Anzahl wahrgenommener und erkannter Formen bei jeder Formtiefe lässt sich damit insgesamt aussagen, dass eine Wahrnehmung der Form bei signifikant kleinerer Formgröße möglich ist als eine Formerkennung. Dies gilt für die hier betrachteten Formtiefen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm.

#### 4.4. Einfluss des Alters

Für die Untersuchung, ob es einen Unterschied bei der Formwahrnehmung bzw. Formerkennung in Abhängigkeit vom Alter der Probanden gibt, wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Im Vorfeld wurden nochmals die Mediane und Standardabweichungen für die Formwahrnehmung und –Erkennung der beiden betrachteten Altersgruppen für jede Formtiefe ermittelt. Diese sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für die Altersgruppen <40 Jahre und ≥40 Jahre

		Tiefe [mm]					
		0,1		0,3		0,5	
		Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]
wahrgenommen	<40 Jahre (n = 42)	2	1,34	2	0,76	2	0,79
	≥40 Jahre (n=29)	3	1,49	3	1,45	2	1,16
erkannt	<40 Jahre (n = 42)	7	1,96	5	1,57	5	1,35
	≥40 Jahre (n=29)	8	1,82	7	1,78	6	1,67

Da sich bereits gezeigt hat, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen Formwahrnehmung und –erkennung gibt, wurden diese jeweils separat bei den unterschiedlichen Formtiefen betrachtet. Die Signifikanzwerte für die Untersuchung des Alterseinflusses auf die Formwahrnehmung und -erkennung sind in Tabelle 4-5 dargestellt. In allen Fällen - außer bei der Formerkennung bei 0,5 mm tiefen Formen - ergeben sich zwischen den Altersgruppen signifikante Unterschiede. Betrachtet man die Ergebnisse der ermittelten Mediane und Standardabweichungen in Kombination mit den Ergebnissen des Mann-Whitney-U-Tests, so lässt sich aussagen, dass, außer bei 0,5 mm Formtiefe bei der Formerkennung, Probanden bis 40 Jahre die Formen bereits bei signifikant geringerer Formgröße wahrnehmen und erkennen als Probanden im Alter von 40 Jahren und älter.

Tabelle 4-5: Ergebnisse Mann-Whitney-U-Test für Untersuchung des Alterseinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung

	Tiefe [mm]		
	0,1	0,3	0,5
p wahrgenommen	,013*	≤,001*	≤,001*
p erkannt	,003*	,005*	,344

#### 4.5. Einfluss des Geschlechts

Vor Durchführung des Mann-Whitney-U-Tests wurden die Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung und –erkennung für männliche und weibliche Probanden ermittelt. Diese sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-6: Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für männliche und weibliche Probanden

		Tiefe [mm]					
		0,1		0,3		0,5	
		Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]
wahrgenommen	männlich (n=36)	3	1,41	2	1,03	2	0,92
	weiblich (n=35)	2	1,38	2	1,30	2	1,10
erkannt	männlich (n=36)	8	1,94	6	1,67	6	1,35
	weiblich (n=35)	6	1,81	5	1,76	5	0,92

Die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests zur Untersuchung des Einflusses des Geschlechts auf die Formwahrnehmung und –erkennung sind in Tabelle 4-7 dargestellt. Betrachtet man die Formwahrnehmung, so ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Geschlechtern bei 0,1 mm und 0,3 mm tiefen Formen. Für die Formerkennung ergibt sich lediglich bei 0,1 mm tiefen Formen ein signifikanter Unterschied für männliche und weibliche Probanden. Betrachtet man die Mediane und die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests, so lässt sich aussagen, dass die weiblichen Probanden die Formen signifikant besser wahrnehmen, sofern die Formtiefe 0,1 oder 0,3 mm beträgt. Ebenso ist die Formerkennung bei den weiblichen Probanden bei 0,1 mm Formtiefe deutlich besser.

Tabelle 4-7: Ergebnisse Mann-Whitney-U-Test für Untersuchung des Geschlechtseinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung

	Tiefe [mm]		
	0,1	0,3	0,5
p wahrgenommen	,007*	,013*	,287
p erkannt	,028*	,495	,181

#### 4.6. Einfluss des Materials

Für die Untersuchung des Materialeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung wurden ebenfalls im Vorfeld die Mediane und Standardabweichungen für die einzelnen Materialien und Formtiefen ermittelt. Diese sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Bei der Formwahrnehmung zeigt sich bei den Materialien kein Unterschied bei den Medianen der Formgröße, welche für die Wahrnehmung benötigt wurde. Dies gilt für alle Formtiefen. Die Standardabweichung ist jedoch bei Silikon immer höher als bei den anderen Materialien, was für eine höhere Streuung der Ergebnisse spricht. Bei der Formerkennung wird bei Silikon bei 0,1 mm und 0,3 mm Formtiefe eine größere Form benötigt als bei PVC und Aluminium. Bei 0,5 mm Formtiefe ist der Median für alle Materialien identisch.

Tabelle 4-8: Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für die Materialien Silikon, PVC und Aluminium

		Tiefe [mm]					
		0,1		0,3		0,5	
		Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]	Median [mm]	SD [mm]
wahrgenommen	Silikon	2	1,30	2	1,29	2	1,00
	PVC	2	0,81	2	0,81	2	0,79
	Aluminium	2	0,73	2	0,87	2	0,65
erkannt	Silikon	7	1,76	6	1,66	6	1,49
	PVC	6	1,48	6	1,32	6	1,43
	Aluminium	6	1,26	5	1,42	6	1,28

Die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests zur Untersuchung des Materialeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung können Tabelle 4-9 entnommen werden. Für die Formwahrnehmung ergab sich bei 0,1 mm und für 0,5 mm Formtiefe ein signifikanter Unterschied bezüglich der verwendeten Materialien. Bei der Formerkennung waren bei 0,1 mm Formtiefe signifikante Unterschiede für die Materialien erkennbar.

Tabelle 4-9: Ergebnisse Kruskal-Wallis-Test für Untersuchung des Materialeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung

	Tiefe [mm]		
	0,1	0,3	0,5
p wahrgenommen	,044*	,067	≤,00*1
p erkannt	≤,001*	,070	,329

Um zu untersuchen welche Materialien sich signifikant unterscheiden, wurde im Anschluss ein Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich von jeweils zwei Materialien durchgeführt. Die Ergebnisse können Tabelle 4-10 entnommen werden. Betrachtet man die Formwahrnehmung, so ergeben sich zwischen Silikon und PVC nur bei 0,1 mm Formtiefe signifikante Unterschiede. Beim Vergleich Silikon-Aluminium sind signifikante Unterschiede bei Formtiefen 0,1 mm und 0,5 mm zu erkennen. Beim Vergleich PVC und Aluminium bei 0,1 mm und 0,5 mm Formtiefe. Bei der Formerkennung ergeben sich bei Silikon und PVC signifikante Unterschiede bei 0,1 mm

Formtiefe und beim Vergleich Silikon und Aluminium bei 0,1 mm und 0,3 mm Formtiefe. Zwischen Aluminium und PVC sind bei der Formerkennung keine signifikanten Unterschiede deutlich.

Insgesamt lässt sich somit zusammenfassen, dass PVC und Silikon sich in der Formwahrnehmung und Erkennung bei geringer Formtiefe stark unterscheiden, sie sich jedoch mit zunehmender Formtiefe weniger unterscheiden. Beim Vergleich Silikon und Aluminium sind die Ergebnisse für die Wahrnehmung schwankend, bei der Formerkennung ist jedoch ein signifikanter Unterschied erkennbar, der mit zunehmender Formtiefe abnimmt. Beim Vergleich PVC und Aluminium ergeben sich mit steigender Formtiefe deutliche Unterschiede in der Wahrnehmung, während keine signifikanten Unterschiede in der Formerkennung deutlich werden. Insgesamt lässt sich bei Betrachtung der Mediane und der Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests aussagen, dass Silikon für die Formwahrnehmung und –erkennung bei 0,1 mm Formtiefe deutlich schlechter geeignet ist als PVC und Aluminium. Im Vergleich zu Aluminium sind bei Silikon auch die Formwahrnehmung bei 0,5 mm Formtiefe und die Formerkennung bei 0,3 mm Formtiefe deutlich schlechter.

Tabelle 4-10: Ergebnisse des Paarvergleiches der Materialien mittels des Mann-Whitney-U-Tests

	Silikon-PVC			Silikon-Aluminium			PVC-Aluminium		
	Tiefe [mm]			Tiefe [mm]			Tiefe [mm]		
	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
p wahrgenommen	,027*	,386	,477	,045*	,200	≤,001*	,617	,015*	≤,001*
p erkannt	≤,001*	,123	,917	≤,001*	,027*	,232	,176	,410	,167

#### 4.7. Einfluss Formtiefe vs. Formgröße

Zur Untersuchung ob die Formgröße oder die Formtiefe einen größeren Einfluss auf die Formwahrnehmung bzw. –Erkennung hat, wurde eine lineare, multiple Regression berechnet. Hierfür wurden im Vorfeld nochmals die Anzahl wahrgenommener und erkannter Formen je Formgröße und Formtiefe ermittelt. Betrachtet wurden hierbei die kumulierten Werte mit aufsteigender Formgröße, d.h. steht bei einer Formtiefe von 0,1 mm bei 4 mm Formgröße der Wert 188, so bedeutet dies, dass bis hierhin 188 der Formen durch die Probanden wahrgenommen wurden. Die Zahl beinhaltet also die Summe der Formen, welche bei 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm wahrgenommen wurden. Bei 71 Probanden und 3 Formen ergibt sich ein maximal möglicher Wert von 213. Die Ergebnisse dieser Aufwertung sind nochmals in Tabelle 4-11 dargestellt. Sie beinhaltet neben der kumulierten Anzahl auch die kumulierten % der wahrgenommenen bzw. erkannten Formen.

Tabelle 4-11: Kumulierte Anzahl und kumulierte % wahrgenommener bzw. erkannter Formen für die Formtiefen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm

	Größe [mm]	Tiefe [mm]					
		0,1		0,3		0,5	
		Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
wahrgenommen	1	47	22%	40	19%	56	26%
	2	110	52%	141	66%	145	68%
	3	164	77%	186	87%	190	89%
	4	188	88%	200	94%	208	98%
	5	203	95%	208	98%	212	100%
	6	203	95%	211	99%	213	100%
	7	206	97%	212	100%	213	100%
	8	207	97%	213	100%	213	100%
	9	208	98%	213	100%	213	100%
	10	208	98%	213	100%	213	100%
erkannt	1	0	0%	0	0%	0	0%
	2	1	0%	2	1%	2	1%
	3	5	2%	12	6%	11	5%
	4	11	5%	44	21%	41	19%
	5	21	10%	78	37%	83	39%
	6	41	19%	113	53%	123	58%
	7	56	26%	136	64%	151	71%
	8	72	34%	154	72%	162	76%
	9	88	41%	163	77%	165	77%
	10	98	46%	165	77%	167	78%

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in Tabelle 4-12 dargestellt. Betrachtet man die Effektstärke so wird deutlich, dass die Formgröße sowohl bei der Wahrnehmung als auch bei der Formerkennung eine größere Rolle spielt. Dies gilt im Bereich der untersuchten Formgrößen 1-10 mm und Formtiefen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm.

Tabelle 4-12: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse

	R-Quadrat	Effektstärke	
		Formgröße	Formtiefe
wahrgenommen	,552	,756	,105
erkannt	,866	,873	,335

---

#### 4.8. Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt konnten die Ergebnisse der statistischen Auswertung bereits einige interessante Einflüsse auf die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen liefern. Für die Auswertungen wurden jedoch teilweise Daten aus zwei Versuchen kombiniert, um ein größeres Probandenkollektiv zu haben. Die Versuche liefen nach gleichem Versuchskonzept unter gleichen Rahmenbedingungen ab. Daher wird davon ausgegangen, dass dadurch die Ergebnisse der Versuche miteinander kombinierbar sind. Allerdings kann ein geringer Einfluss, da es sich um Studien mit unterschiedlichen Zielen handelte, nicht komplett ausgeschlossen werden.

Das Probandenkollektiv war insgesamt jedoch recht gering. So standen für die Auswertung des Materialeinflusses beispielsweise nur Daten von 40 Probanden zur Verfügung. Mit Hilfe eines Bootstraps wurde jedoch in SPSS ein größeres Probandenkollektiv mit 100, 500 und 1000 Probanden simuliert. Es zeigte sich dabei keine deutliche Veränderung der Ergebnisse. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Ergebnisse mit einem größeren Probandenkollektiv zwar leicht verändern, große Änderungen sind jedoch nicht zu erwarten.

Die Regressionanalyse ergab, dass die Formgröße einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen hat als die Formtiefe. Dies gilt jedoch nur für die im Versuch verwendeten Formgröße und Tiefen. Betrachtet man die Daten der deskriptiven Statistik so wird deutlich, dass bereits bei 0,1 mm Formtiefe die Anzahl wahrgenommener Formen sehr hoch ist. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Wahrnehmungsschwelle unterhalb von 0,1 mm Formtiefe befindet. Es ist daher möglich, dass bei Versuchen mit geringeren Formtiefen eine Regressionsanalyse einen stärkeren Einfluss der Formtiefe aufzeigt.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Form auf die Wahrnehmung und Erkennung ergeben sich nicht in allen Fällen signifikante Unterschiede. Dies kann mit den gewählten Formen und mit den verwendeten Formtiefen und -größen zusammenhängen. Es ist denkbar, dass sich für andere Formen deutlichere Unterschiede ergeben. Wahrscheinlich ist aber auch, dass die Formen schwerer unterscheidbar werden wenn sie sich stärker ähneln. So wird beispielsweise vermutet, dass ein Kreis und ein Achteck schwer zu unterscheiden sind. Hierfür sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Ganz deutlich ist hingegen der Unterschied zwischen der Formwahrnehmung und Erkennung. Jedoch ist auch hier davon auszugehen, dass dieser Unterschied z.B. bei anderen Formgrößen und -tiefen deutlicher oder nicht mehr erkennbar ist.

Bei der Untersuchung des Alters zeigt sich insgesamt ein Unterschied zwischen den bis 40 Jahre alten Probanden und den Probanden 40 Jahre und älter, ins besondere bei der Formwahrnehmung. Bei der Formerkennung ist bei 0,5 mm Formtiefe kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Altersgruppen erkennbar. Es ist jedoch möglich, dass sich ein noch deutlicherer Einfluss des Alters zeigt, sofern man Probanden mit noch höherem Alter für die Versuche wählt.



---

Beim Geschlecht zeigen sich insgesamt Einflüsse bei der Formwahrnehmung bis 0,3 mm Formtiefe und bei der Formerkennung bei 0,1 mm Formtiefe. Mit zunehmender Formtiefe sind keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den Geschlechtern erkennbar. Daher ist davon auszugehen, dass das Geschlecht nur bei geringen Formtiefen einen Einfluss auf die Formwahrnehmung und -erkennung hat und es einen Grenzwert gibt, ab welchem die Unterschiede nicht mehr signifikant sind. Wo diese Grenzwerte liegen müsste mit Hilfe weiterer Versuche ermittelt werden, bei welchen geringere Abstufungen der Formtiefe im Bereich 0,1 mm bis 0,3 mm verwendet werden.

---

## 5. Gestaltungshinweise für konkave Rückmeldungen

---

Im Folgenden werden, auf Basis der durchgeführten Versuche, Gestaltungshinweise abgeleitet. Die Gestaltungshinweise können genutzt werden, um neuartige Bedienkonzepte, welche konkave Formen beispielsweise als Bedienhilfe verwenden, zu planen. Als Bedienhilfe können diese beispielsweise dienen, um eine Orientierungshilfe zu geben, beispielsweise um ohne Sicht zu vermitteln, wo sich Eingabeelemente befinden. Dabei gilt es, im Vorfeld die typische Nutzergruppe zu identifizieren. Im Anschluss muss entschieden werden, wie wichtig es für das Produkt und/oder das Bedienkonzept ist, dass der Nutzer die konkaven Formen wahrnimmt oder sogar erkennt. Handelt es sich dabei beispielsweise um ein eher zusätzliches Gimmick, so reicht es ggf. aus, wenn wenige Nutzer das Feedback spüren. Im Gegensatz dazu ist es bei Formen, welche für die Bedienung zwingend erforderlich sind, wichtiger, dass möglichst alle Nutzer diese ertasten können.

Bei neuartigen Technologien wie beispielsweise den in dieser Arbeit beschriebenen DEAs können die Gestaltungshinweise ebenfalls dazu dienen, zu überprüfen, inwieweit die vorhandene Technologie für geplante Einsatzmöglichkeiten, wie beispielsweise das Nachbilden einer Tastatur, geeignet ist. Danach kann auch entschieden werden, ob es sich finanziell lohnt, diese Technologie für den geplanten Anwendungsbereich weiter zu entwickeln, da sie beispielsweise die Anforderungen bereits nahezu erfüllt, oder ob eine weitere Entwicklung für den geplanten Anwendungsfall nicht rentabel ist. Erfüllt eine Technologie jedoch die für den Anwendungsfall definierten Anforderungen nicht, so sollte sie nicht gleich verworfen werden. Es gilt eher darüber nachzudenken, ob die Technologie gegebenenfalls in anderen Anwendungsfällen, in welchen die Anforderungen geringer sind, sinnvoll eingesetzt werden kann.

Die Gestaltungshinweise können nicht nur für zukünftige Bedienkonzepte genutzt werden. Prinzipiell ist auch eine Nutzung für bestehende Technologien und Interaktionskonzepte möglich, um deren Eignung zu prüfen oder Verbesserungspotenziale aufzudecken.

Die Gestaltungsempfehlungen basieren auf den Ergebnissen der vier durchgeführten Studien und werden im Folgenden dargestellt.

---

## 5.1. Übersicht ermittelter Gestaltungshinweise

Die Gestaltungshinweise wurden auf Basis der in Kapitel 3 beschriebenen Studien erstellt. Dabei wurden die Daten der Versuche 1 und 4 für Silikon, wie bereits bei der statistischen Auswertung (siehe Kapitel 4.1), kombiniert, um für die Gestaltungshinweise eine größere Datenbasis zu haben. Daher sind auch nur Gestaltungshinweise für 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm Formtiefe dargestellt. Bei den Gestaltungshinweisen für Silikon bei ungeführter Bewegung wurde sich daher für eine bessere Vergleichbarkeit auch auf diese Formtiefen beschränkt. Um die Gestaltungshinweise übersichtlich darzustellen, wurde eine tabellarische Darstellung gewählt. Insgesamt umfasst die Darstellung 7 Tabellen. Für die Gestaltungshinweise wurden die Formen nicht getrennt voneinander betrachtet, da sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Formen ergeben haben (vgl. Kapitel 4.2). Jede Tabelle wurde für eine andere Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit erstellt. Insgesamt werden die Wahrscheinlichkeiten 100%, 95 %, 90 %, 80 %, 70 %, 60 % und 50 % über die Tabellen abgedeckt. Die Tabelle 95 % gibt dabei beispielsweise an, welche Tiefe und welche Abmessung eine konkave Form haben muss, um in mindestens 95 % der Fälle wahrgenommen bzw. erkannt zu werden. Die 100%-Tabelle ergibt sich hier jedoch nur für das ausgewählte Probandenkollektiv. Für reale Anwendungen ist es eher unwahrscheinlich, dass eine Entdeckens- bzw. Erkennungswahrscheinlichkeit von 100% erreicht werden kann. Die Tabelle zu 95% und 90% sind in Anlehnung an typische Tabellen im anthropometrischen Bereich entstanden, wobei 95%-Tabellen für sicherheitskritische Anwendungen verwendet werden. 90% werden üblicherweise verwendet. Auch ein gängiges Maß bei anthropometrischen Werten sind 50%, welche in den Tabellen aufgegriffen werden. Für diese Arbeit wurden jedoch noch einige Zwischenwerte in 10%-Abständen eingefügt.

Die Gestaltungshinweise sind in jeder Tabelle sowohl gemittelt über alle Probanden aufgeführt als auch für die Altersgruppen bis 40 Jahre und 40 Jahre und älter und beide Geschlechter. Sofern ein bestimmtes Kriterium nicht erreicht wurde, z. B. dann, wenn eine Formerkennung mit 100 % nicht möglich war, so ist dies in der Tabelle mit einem „–“ gekennzeichnet. Da an Studie 2 nur Probanden unter 40 Jahre teilnahmen gibt es entsprechend keine Gestaltungshinweise für über 40 Jahre alte Personen. Die fehlenden Werte sind in den Tabellen jeweils mit n.u. für nicht untersucht gekennzeichnet.

Die Tabellen sind nach absteigender Wahrscheinlichkeit geordnet. Zu jeder Tabelle folgt eine kurze Erläuterung. Es wird angemerkt, dass es sich bei den empfohlenen Formgrößen und Formtiefen, abgesehen von den Empfehlungen bei der Zweipunktschwelle, immer um Mindestempfehlungen handelt. Sofern die Formen größer und/oder tiefer gewählt werden, wird lediglich die Wahrscheinlichkeit des Wahrnehmens bzw. Erkennens erhöht.

In Tabelle 5-1 sind die Gestaltungshinweise für eine Formwahrnehmung und –erkennung mit 100% Wahrscheinlichkeit dargestellt. Insgesamt fällt hierbei auf, dass bei geführten Bewegungen bei Silikon bei 0,1 mm Formtiefe keine Formwahrnehmung mit 100% gewährleistet werden kann. Ebenso ist eine Formerkennung

bei Silikon bei keiner Formtiefe mit 100% Wahrscheinlichkeit möglich. Auch bei PVC ist nur bei einzelnen Gruppen (unter 40 Jahre alte Probanden sowie männliche Probanden) eine Formerkennung in 100% der Fälle möglich. Bei ungeführten Bewegungen bei der Verwendung von Silikon können nur weibliche Probanden bei 0,5 mm Formtiefe in 100% der Fälle die Formen wahrnehmen. Bei der Zweipunktschwelle wurden nur von unter 40 Jahre alten Probanden 100% der Punktpaare richtig erkannt.

Tabelle 5-1: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

100 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	7	6	8	8	6
		0,5	5	4	6	6	5
	Form erkennen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	-	-	-	-	-
		0,5	-	-	-	-	-
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	5	4	5	4	5
		0,3	5	3	5	5	5
		0,5	5	3	5	4	5
	Form erkennen	0,1	-	8	-	-	10
		0,3	-	8	-	-	9
		0,5	-	7	-	-	9
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	5	3	5	4	5
		0,3	5	4	5	5	4
		0,5	5	3	5	5	5
	Form erkennen	0,1	-	9	-	-	9
		0,3	10	7	10	10	9
		0,5	10	7	9	9	9
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	-	-	n.u.	-	-
		0,3	-	-	n.u.	-	-
		0,5	-	-	n.u.	7	-
Punktpaare	Punktabstand	0,1	-	2-2,5	-	-	-
		0,3	-	1,5 und 2,5-3,5	-	-	-
		0,5	-	1,5 und 2,5-3	-	-	-

Tabelle 5-2 zeigt die Gestaltungshinweise für 95% Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit. Bei Silikon können bei geführten Bewegungen bei allen Probandengruppen und Formtiefen mindestens 95% der Formen wahrgenommen werden. Die Dafür benötigte Formgröße sinkt bei allen betrachteten Probandengruppen mit zunehmender Formtiefe. Jedoch ist in keinem Fall eine Formerkennung möglich. Bei PVC hingegen werden bei allen Formtiefen von allen Probandengruppen mindestens 95% der Formen wahrgenommen und sogar erkannt. Gleiches gilt für Aluminium mit Ausnahme der Formerkennung bei 0,1 mm Formtiefe für weibliche Probanden und Probanden über 40 Jahre. Bei ungeführten Bewegungen sind bei Silikon für alle außer männlichen Probanden eine Formwahrnehmung mit mindestens 95% bei 0,5 mm Formtiefe möglich. Eine richtige Erkennung der Punktpaare war nur in einzelnen Fällen mit mindestens 95% Wahrscheinlichkeit möglich.

Tabelle 5-2: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 95 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

95 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	5	5	7	5	5
		0,3	5	3	5	5	4
		0,5	4	3	5	4	4
	Form erkennen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	-	-	-	-	-
		0,5	-	-	-	-	-
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	4	3	4	4	4
		0,3	4	3	4	4	4
		0,5	4	3	4	4	4
	Form erkennen	0,1	9	7	10	10	9
		0,3	9	7	10	10	8
		0,5	9	6	10	10	8
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	4	3	4	4	4
		0,3	3	3	4	4	4
		0,5	3	2	3	2	3
	Form erkennen	0,1	9	8	-	-	8
		0,3	9	7	9	8	8
		0,5	8	7	8	7	8
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	-	-	n.u.	-	-
		0,3	-	-	n.u.	-	-
		0,5	7	7	n.u.	7	-
Punktpaare	Punktabstand	0,1	-	1,5-3,5	-	-	-
		0,3	2,5	1,5-3,5	-	2,5	-
		0,5	2,5	1,5-3,5	-	-	2,5

Die Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmung und Erkennung mit mindestens 90% Wahrscheinlichkeit sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Ist eine Formerkennung bei Silikon von 90% ausreichend, so ist dies, gegenüber 95% Wahrscheinlichkeit, bereits in einigen Fällen möglich. So können Probanden unter 40 Jahre und männliche Probanden ab 0,3 mm Formtiefe mit mindestens 90% Wahrscheinlichkeiten die Formen in Silikon erkennen. Bei allen Probandengruppen ist bei geführten Bewegungen bei Silikon eine Formerkennung mit mindestens 90% Wahrscheinlichkeit bei 0,5 mm Formtiefe möglich. Bei Aluminium ist nun, wie bei PVC auch, bei allen Formtiefen eine Formwahrnehmung und Erkennung mit mindestens 90% möglich. Bei ungeführten Bewegungen ist bei Silikon, außer von männlichen Probanden bei 0,1 mm Formtiefe, auch bei allen Probanden und Formtiefen eine Formwahrnehmung mit mindestens 90% Wahrscheinlichkeit möglich. Auch ein richtiges Erkennen von Punktpaaren ist bei 0,1 mm Formtiefe bereits für unter 40 Jahre alte und für männliche Probanden bei unterschiedlichen Punktabständen möglich. Bei 0,3 mm Formtiefe können alle Probandengruppen, wenn auch bei unterschiedlichen Punktabständen, mindestens 90% der Punktpaare richtig als solche erkennen.

Tabelle 5-3: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 90 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

90%		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	5	4	5	4	5
		0,3	4	3	5	4	4
		0,5	4	3	4	4	3
	Form erkennen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	10	10	-	-	9
		0,5	10	9	10	10	9
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	4	3	4
		0,3	3	3	4	3	4
		0,5	3	2	4	3	3
	Form erkennen	0,1	8	7	9	8	8
		0,3	8	6	9	8	7
		0,5	8	6	9	8	7
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	4	3	4
		0,3	2	3	4	2	4
		0,5	2	2	2	2	3
	Form erkennen	0,1	8	6	8	8	8
		0,3	8	6	8	8	7
		0,5	7	6	8	7	7
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	7	7	n.u.	7	-
		0,3	7	7	n.u.	7	7
		0,5	7	7	n.u.	7	3
Punktpaare	Punktabstand	0,1	-	1,5-3,5	-	-	3,5
		0,3	2,5	1,5-3,5 und 5	2,5	1,5-2,5	2,5
		0,5	2-2,5	1,5-3,5 und 5	2-2,5	1,5-3,5	2-2,5

Die Gestaltungshinweise für 80% Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit sind in Tabelle 5-4 dargestellt. Gegenüber 90% Wahrscheinlichkeit sind die benötigte Formtgröße für eine Formwahrnehmung bei geführten Bewegungen. Auch werden von allen Probandengruppen ab 0,3 mm Formtiefe bei geführten Bewegungen bei Silikon mindestens 80% der Formen erkannt. Gegenüber 90% Wahrscheinlichkeit sinkt bei Aluminium und PVC die benötigte Formgröße für die Formwahrnehmung und –erkennung. Auch können von allen Probandengruppen bei allen Formtiefen mindestens 80% der Formen bei ungeführten Bewegungen wahrgenommen werden. Bis auf Probanden über 40 Jahre bei 0,1 mm können von allen Probandengruppen bei allen Formtiefen mindestens 80% der Punktpaare richtig als solche erkannt werden. Die dafür benötigten Punktabstände unterschieden sich jedoch je nach Gruppe und Formtiefe.

Tabelle 5-4: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 80 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

80 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	4	3	4	4	4
		0,3	3	2	4	4	3
		0,5	3	3	4	4	3
	Form erkennen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	8	7	9	9	8
		0,5	7	7	8	7	7
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	3	3	3
		0,3	3	2	3	3	3
		0,5	3	2	3	3	3
	Form erkennen	0,1	8	7	8	8	7
		0,3	7	6	8	7	6
		0,5	7	6	8	7	6
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	2	3	3	3
		0,3	3	2	3	3	3
		0,5	2	2	2	2	2
	Form erkennen	0,1	7	6	7	7	7
		0,3	7	6	8	6	7
		0,5	6	6	7	6	7
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	4	4	n.u.	4	4
		0,3	4	4	n.u.	4	4
		0,5	3	3	n.u.	3	3
Punktpaare	Punktabstand	0,1	2,5-3,5	1,5-4	-	2-2,5	2,5-3,5
		0,3	1,5-3,5	1,5-5	02. Mrz	1,5-3	2,5-4
		0,5	1,5-3,5	1,5-5	2-3,5	1,5-3,5	2-3,5

Ist eine Wahrnehmung bzw. Erkennung in 70% ausreichend, so können die Gestaltungshinweise aus Tabelle 5-5 angewendet werden. Weiterhin fällt auf, dass eine Formerkennung bei geführten Bewegungen in Silikon bei 0,1 mm Formtiefe nicht möglich ist. Sonst sinken die benötigten Formgrößen für die Formerkennung und Formwahrnehmung bei den unterschiedlichen Materialien gegenüber denen bei einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 80%. Eine richtige Erkennung von mindestens 70% der Formpaare wird bei allen Probandengruppen und Formtiefen erreicht, wenn sich auch die Punktabstände je nach Gruppe und Formtiefe unterscheiden.

Tabelle 5-5: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 70 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

70 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	4	3	3
		0,3	3	2	3	2	3
		0,5	3	2	3	2	3
	Form erkennen	0,1	-	-	-	-	-
		0,3	7	6	8	7	7
		0,5	7	6	7	7	7
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	2	3	3	3
		0,3	3	2	3	3	3
		0,5	3	2	3	3	3
	Form erkennen	0,1	7	6	8	7	7
		0,3	6	6	7	6	6
		0,5	6	6	7	6	6
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	2	3	3	3
		0,3	3	2	3	2	3
		0,5	2	2	2	2	2
	Form erkennen	0,1	6	6	7	6	7
		0,3	6	5	7	6	6
		0,5	6	6	6	6	6
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	4	4	n.u.	3	4
		0,3	4	4	n.u.	3	4
		0,5	3	3	n.u.	3	3
Punktpaare	Punktabstand	0,1	2-3,5	1,5-4	2,5-3,5	1,5-3,5	02. Apr
		0,3	1,5-5	1,5-5	02. Apr	1,5-4	1,5-5
		0,5	1,5-4	1,5-5	1,5-3,5	1,5-4	1,5-3,5

Die Gestaltungshinweise für 60% Entdeckens- und Erkennungswahrscheinlichkeit sind in Tabelle 5-6 dargestellt. Dike unter 40 Jahre alten Probanden können mit mindestens 60% Wahrscheinlichkeit bei geführten Bewegungen in Silikon die Formen richtig erkennen. Auf die anderen Probandengruppen trifft dies nicht zu. Sonst sinkt die benötigte Formgröße tendenziell bei allen Probandengruppen und Formtiefen gegenüber den Werten bei 70% Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit.



Tabelle 5-6: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 60 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

60 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	3	2	3
		0,3	2	2	3	2	3
		0,5	2	2	3	2	2
	Form erkennen	0,1	-	10	-	-	-
		0,3	6	6	8	6	7
		0,5	6	6	7	6	6
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	3	2	3	3	3
		0,3	2	2	3	2	3
		0,5	2	2	3	2	2
	Form erkennen	0,1	6	6	7	6	6
		0,3	6	6	6	6	6
		0,5	6	6	7	6	6
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	2	2	3	2	3
		0,3	2	2	3	2	3
		0,5	2	2	2	2	2
	Form erkennen	0,1	6	5	7	6	6
		0,3	6	5	7	6	6
		0,5	6	6	6	6	6
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	n.u.	3	4
		0,3	3	3	n.u.	3	3
		0,5	3	3	n.u.	3	3
Punktpaare	Punktabstand	0,1	1,5-4	1,5-5	2-3,5	1,5-3,5	02. Apr
		0,3	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5
		0,5	1,5-5	1,5-5	1,5-4	1,5-5	1,5-5

In Tabelle 5-7 sind die Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmung und Erkennung in 50% der Fälle dargestellt. Eine Formerkennung ist bei dieser Anforderung an die Erkennungswahrscheinlichkeit nun bei allen Probandengruppen außer bei über 40 Jahre alten Probanden nun auch bei 0,1 mm Formtiefe möglich.

Tabelle 5-7: Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, -: wurde nicht erreicht)

50 %		Formtiefe [mm]	Alle Probanden	Alter		Geschlecht	
				< 40 Jahre	> 40 Jahre	Weiblich	Männlich
Silikon, geführt	Form wahrnehmen	0,1	2	2	3	2	3
		0,3	2	2	3	2	2
		0,5	2	2	2	2	2
	Form erkennen	0,1	10	9	-	8	10
		0,3	6	6	7	6	6
		0,5	6	5	6	5	6
PVC, geführt	Form wahrnehmen	0,1	2	2	3	2	2
		0,3	2	2	3	2	2
		0,5	2	2	3	2	2
	Form erkennen	0,1	6	6	7	6	6
		0,3	6	5	6	6	6
		0,5	6	5	6	6	6
Aluminium, geführt	Form wahrnehmen	0,1	2	2	3	2	2
		0,3	2	2	2	2	2
		0,5	2	2	2	2	2
	Form erkennen	0,1	6	5	6	6	6
		0,3	5	5	6	5	6
		0,5	6	5	6	5	6
Silikon, ungeführt	Form wahrnehmen	0,1	3	3	n.u.	3	3
		0,3	3	3	n.u.	3	3
		0,5	3	3	n.u.	3	3
Punktpaare	Punktabstand	0,1	1,5-4	1,5-5	1,5-4	1,5-4	1,5-5
		0,3	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5
		0,5	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5	1,5-5

---

## 5.2. Zusammenfassung der Gestaltungshinweise

In Kapitel 5.1 wurden die Gestaltungshinweise für unterschiedliche Prozentzahlen erstellt. Die Prozentzahlen geben dabei an wie viele der Anwender eine entsprechende konkave Form voraussichtlich, auf Basis der erstellten Versuche, wahrgenommen bzw. erkennen können. Die Gestaltungshinweise wurden dabei allgemein für ein gemischtes Probandenkollektiv, sowie für männliche und weibliche und die Altersgruppen unter 40 Jahre und 40 Jahre und älter erstellt. Somit können die entsprechenden Werte für den typischen Nutzer der geplanten Anwendung ermittelt werden. Darüber hinaus wurden die Gestaltungshinweise für unterschiedliche Materialien erstellt.

Die Gestaltungshinweise können nun für die Gestaltung konkaver Rückmeldungen genutzt werden. Ein beispielhafter Anwendungsfall wäre die Gestaltung eines neuen Bedienelementes für eine Industriemaschine, bei welcher es ein Bedienpanel gibt. Häufig ist der Platz für das Bedienpanel begrenzt, es müssen aber bestimmte Bedienelemente darauf angebracht werden. So könnte sich beispielsweise aus Platzgründen und der Anzahl benötigter Bedienelemente ergeben, dass die Bedienelemente höchstens 5mm groß sein dürfen. Die Formen sollen von den vornehmlich männlichen Nutzern wahrgenommen werden, müssen aber nicht erkannt werden. Allerdings ist es wichtig, dass alle Nutzer die Bedienelemente ertasten können. Damit kommt Tabelle 5-1 zum Einsatz. Betrachtet man diese Anforderung, so könnten alle Materialien genutzt werden, sofern die Bedienelemente beliebig dick sein dürfen. Kommt aber beispielsweise noch eine Anforderung hinzu, dass die Bedienelemente maximal 0,3mm Tiefe in Anspruch nehmen dürfen, so wäre nach Tabelle 5-1 nur noch PVC und Aluminium geeignet, nicht jedoch Silikon. Welches dieser Materialien nun verwendet wird kann vom Entwickler nach anderen Kriterien ausgewählt werden, wie beispielsweise Preis, Ästhetik oder ähnlichem.

Wie dieses Beispiel zeigt können die Gestaltungshinweise also für die Gestaltung neuer Bedienelemente mit konkaver Rückmeldung genutzt werden. Der obige Anwendungsfall ist nur beispielhaft und lässt sich dabei auf andere Anwendungsfälle übertragen.

---

### 5.3. Grenzen der Gestaltungshinweise

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Parameter und deren Einfluss auf die taktile Wahrnehmung untersucht. Daraus wurden Gestaltungshinweise für konkave Formen abgeleitet, welche beschreiben, wie groß und wie tief diese sein müssen, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wahrgenommen oder erkannt zu werden. Jedoch haben die Gestaltungshinweise auch Grenzen, welche im Folgenden erläutert werden.

In allen Versuchen betrug die geringste untersuchte Formtiefe 0,1 mm. Es zeigt sich jedoch teilweise deutlich, dass bereits bei 0,1 mm Formtiefe alle oder ein Großteil der Formen wahrgenommen werden können. Daher wird davon ausgegangen, dass gegebenenfalls auch geringere Formtiefen ausreichend für eine Formwahrnehmung sind. Die Gestaltungshinweise geben daher keine Information über die Wahrnehmungsgrenze konkaver Formen.

Darüber hinaus wurden nur Versuche mit Formgrößen im Bereich 1–10 mm durchgeführt. Die Gestaltungshinweise zeigen deutlich, dass es bei 10 mm immer noch nicht möglich ist, alle der konkaven Formen zu erkennen. Daher können die Gestaltungshinweise nicht genutzt werden, um konkave Formen so zu gestalten, dass sie mit 100-prozentiger Sicherheit erkannt werden.

Die Gestaltungshinweise sind nur auf Basis von konkaven Formen erstellt worden, welche die durch Herstellungszwecke maximal mögliche Kantenschärfe hatten. Allerdings handelt es sich bei Silikon auch um ein verformbares Material, welches bei Überstreichen durch den Fingerdruck zu Verformungen neigt. Daher können die Gestaltungshinweise als Richtwert herangezogen werden. Bei Verwendung anderer Materialien oder anderer konkaver Formen, welche eine Kantenverrundung aufweisen, dienen die Gestaltungshinweise lediglich als Näherungswerte.

Für die Formwahrnehmung und –erkennung wurden die Gestaltungshinweise nur für Silikon, Aluminium und PVC erstellt. Bereits bei diesen Materialien sind Unterschiede bei den Gestaltungshinweisen zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass bei anderen Materialien andere Grenzen für die Formwahrnehmung und –erkennung gelten. Die dargestellten Gestaltungshinweise können für andere Materialien daher lediglich als Richtwerte betrachtet werden.

Insgesamt sein noch darauf hingewiesen, dass die Tabelle 100% nur für das ausgewählte Probandenkollektiv gültig ist und für reale Anwendungen weniger aussagekräftig ist. Eine Entdeckens- und Erkennenswahrscheinlichkeit für ein reales Probandenkollektiv ist eher unwahrscheinlich, da beispielsweise im Rahmen der durchgeführten Versuche auch nur Probanden mit wenig Hornhaut zum Einsatz kamen und die Hauttemperatur so gehalten wurde, dass sie die taktile Wahrnehmung nicht beeinflusst. Im realen Anwendungsfall ist dies eher selten der Fall.

---

## 6. Diskussion

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier Hauptstudien durchgeführt, deren Ergebnisse vorgestellt wurden. Auf Basis dieser Untersuchungen wurden Gestaltungshinweise für die Verwendung konkaver Feedbacks abgeleitet. In diesem Abschnitt sollen nun die Ergebnisse der Versuche und die Gestaltungshinweise mit ihren Stärken und Schwächen diskutiert werden.

Insgesamt wurden die Versuche zum großen Teil geführt durchgeführt. Lediglich zu Silikon gab es eine Untersuchung zu ungeführten Bewegungen. Es muss daher hinterfragt werden, inwieweit die Ergebnisse praxistauglich sind. Sofern das Feedback auf kleinen Flächen erfolgt, sind die Gestaltungshinweise sicherlich anwendbar, jedoch nicht, wenn sich kleine und flache konkave Formen auf einer großen Fläche befinden. Dies sollte bei der Verwendung der erstellten Gestaltungshinweise berücksichtigt werden. Für den Fall, dass es konkretere Anwendungsideen für ein solches Feedback gibt, können die Gestaltungshinweise für eine erste Abschätzung dienen, weitere Versuche sind dann jedoch für den konkreten Anwendungsfall sinnvoll.

Die geringste untersuchte Formtiefe war in allen statischen Versuchen 0,1 mm. Dies war unter anderem durch das Herstellverfahren der Versuchsplatten bedingt. Allerdings zeigen die Versuche, dass bei 0,1 mm Formtiefe häufig schon alle Formen wahrgenommen werden. Daher lassen die erstellten Gestaltungshinweise keinen Rückschluss auf die Wahrnehmungsgrenze konkaver Formen in Abhängigkeit von der Formtiefe zu. Sollte diese von starkem Interesse sein, so sollten entsprechende Versuche mit geringeren Formtiefen durchgeführt werden. Dafür ist ggf. ein geeignetes Herstellverfahren für die Versuchsplatten zu ermitteln.

Es werden, wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt, beispielsweise bei Medikamentenpackungen, je nach Land, Mindesthöhen von 0,25 mm für die Brailleschrift empfohlen. Mit der Aussage von Goodwin et al. (1991) und Louw et al. (2000, 2002), dass konvexe und konkave Formen gleich gut wahrgenommen werden ergibt sich, dass konkave Formen mit 0,25 mm Tiefe gut wahrgenommen werden. Betrachtet man die Ergebnisse der durchgeführten Versuche, so decken sich diese gut mit der Aussage, da die Formen, wie oben beschrieben, bereits ab 0,1 mm gut wahrgenommen werden. Allerdings ist die Formgröße bei der die Formen von allen Probanden bei 0,1 mm Formtiefe wahrgenommen werden größer als die Punkte bei der Brailleschrift. Es handelte sich jedoch bei den Probanden, im Gegensatz zu den Nutzern der Brailleschrift, um nicht trainierte Nutzer. Für einen direkten Vergleich der Empfehlungen für Brailleschrift mit der Wahrnehmung konkaver Formen sind weitere Versuche mit einem geeigneten Versuchskonzept nötig, bei welchem beispielsweise für die konkaven und konvexen Formen nur Kreise mit identischer Formgröße, wie bei der Brailleschrift üblich, verwendet werden. Auch das Probandenkollektiv sollte dann entsprechend angepasst werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen wurden nur unter Verwendung des Zeigefingers durchgeführt. Daher gelten die Gestaltungshinweise nur für die Verwendung des Zeigefingers. Bei anderen Fingern oder anderen Bereichen der Hand kann es zu Ab-

---

weichungen kommen, da die Rezeptordichte bzw. die Rezeptorverteilung eine andere ist (vgl. Kapitel 2.2.2). Daher sollten für eine Prüfung auf die Gültigkeit der Gestaltungshinweise bei anderen Fingern oder anderen Bereichen der Hand weitere Studien durchgeführt werden, sofern dies von Interesse ist.

Der Großteil der Versuche wurde mit konkaven Formen in Silikon durchgeführt, da diese Arbeit durch die Entwicklung der DEA angeregt wurde, welche aus Silikon bestehen. Darüber hinaus wurden noch Aluminium und PVC untersucht sowie ein beschichteter Aktor bei der dynamischen Zweipunktschwelle. Die Gestaltungshinweise konnten daher nur für diese Materialien abgeleitet werden. Ob eine Übertragung auf andere Materialien möglich ist, kann nicht ausgesagt werden. Sicher ist, dass es viele Materialeigenschaften gibt, welche die Wahrnehmung beeinflussen (siehe Kapitel 2.4.1). Welche dies genau sind und wie sie die Wahrnehmung beeinflussen, ist auf Basis der durchgeführten Versuche nicht ableitbar. Für andere Materialien müssen daher eigene Versuche durchgeführt werden, um die Gültigkeit der Gestaltungshinweise zu überprüfen. Für DEAs selbst könnten weitere Versuche mit unterschiedlichen Beschichtungen durchgeführt werden, um zu prüfen, ob diese die Wahrnehmung und Erkennung bei DEA positiv beeinflussen.

Alle Formen waren scharkantig, d. h., die Kanten wiesen keinen Radius auf. Die Gestaltungshinweise sind daher nur für solch scharfkantige konkave Formen gültig. Es ist davon auszugehen, dass sich die Wahrnehmung und Erkennung der Formen mit zunehmender Kantenabrundung verschlechtert, da die Literatur besagt, dass für das Ertasten vor allem Kanten und Ecken eine Rolle spielen (Johnson & Hsiao, 1992). Wie genau eine Kantenabrundung die Wahrnehmung und Erkennung der konkaven Formen beeinflusst, kann so nicht abgeschätzt werden. Um hierfür entsprechende Gestaltungshinweise aufzustellen, sind eigene Versuche nötig.

Die Versuche, aus welchen die Gestaltungshinweise abgeleitet wurden, fanden teilweise im Labor und teilweise bei den Probanden zu Hause statt. Der Grund dafür lag darin, dass es besonders für ältere Probanden nicht möglich war, für die Versuche in das Labor zu kommen. Dies kann allerdings zu einer Beeinflussung der Versuche und deren Ergebnisse führen. Im Labor sind störende Einflussfaktoren wie beispielsweise Umgebungsgeräusche oder sonstige Ablenkungen besser zu kontrollieren. Allerdings ist insgesamt nicht damit zu rechnen, dass die Ergebnisse sehr stark durch Versuche bei den Probanden zu Hause beeinflusst wurden, da der Versuchsleiter dort auch darauf achtete, dass störende Umgebungsbedingungen vor Versuchsbeginn beseitigt wurden (z. B. kein laufender Fernseher etc.).

Bei den geführten Versuchen tasteten die Probanden die Platten ab und orientierten sich dabei an einer Führungskante. Diese wurde so angelegt, dass sie einen Abstand von etwa 5 mm von der Form selbst hatte. Sie bestand aus einem Stück Karton, sodass sie weder besonders scharfkantig noch sehr hoch war. Dies sollte sicherstellen, dass der Reiz durch die Führungsschiene nicht so hoch ist, dass der Reiz der taktilen Wahrnehmung der konkaven Form nicht mehr oder schlechter wahrgenommen wird. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einer Beeinflussung geführt hat und dass die Reize ohne Führungsschiene bei geringeren Formtiefen und Formgrößen wahrgenommen und/oder erkannt worden wären. Allerdings wird auch hier

---

von einem geringen Einfluss ausgegangen. Dies lässt sich damit begründen, dass, auch wenn keine tieferen statistischen Tests durchgeführt wurden, die Formen bei ungeführten Bewegungen erst bei größeren tieferen Formen wahrgenommen und erkannt wurden.

In Kapitel 2.4.2 wurde beschrieben, dass die Temperatur der Haut einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmung hat (Birbaumer & Schmidt, 2005). Die Temperatur an sich wurde jedoch bei den Versuchen nicht überprüft. Es wurde lediglich darauf geachtet, dass Probanden, sofern sie aus einer kalten Umgebung kamen, sich die Finger vor Start des Versuches aufwärmten, um sicherzustellen, dass die Versuche nicht durch kalte, schlecht durchblutete Finger beeinflusst werden. Allerdings wurde keinerlei Temperatur gemessen. Daher ist nicht komplett auszuschließen, dass es hierdurch zu einer Beeinflussung kam, auch wenn die Probanden subjektiv gesehen keine kalten Finger hatten.

Insbesondere in Studie 1 war die Versuchszeit nicht beschränkt. Am Ende der Studie zeigte die Betrachtung rückwirkend, dass einige Probanden die Versuche in einer halben Stunde durchführten, andere Probanden jedoch bis zu 1,5 h brauchten. Dies kann dazu führen, dass sich Trainingseffekte einstellen, sodass die Ergebnisse zum Ende hin besser werden, jedoch kann es auch zu geistiger Ermüdung kommen, was die Ergebnisse verschlechtert. Ob dies der Fall war, kann auf Basis der durchgeführten Versuche nicht überprüft werden. Es kann aber sein, dass es durch diese Effekte zu einer Beeinflussung der Ergebnisse der Studie und somit der Gestaltungshinweise kommt. Daher sollten die Ergebnisse der Studie 1 ggf. nochmals mit einer Begrenzung der Versuchszeit durchgeführt werden, um die bereits ermittelten Gestaltungshinweise zu überprüfen.

---

## 7. Ausblick

---

Insgesamt wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Reihe von Parametern untersucht, welche die Wahrnehmung und Erkennung von konkaven Formen beeinflussen kann. Hierzu gehören Formgröße, Formtiefe, Alter und Geschlecht der Probanden. Ebenso wurden Versuche zur Zweipunktschwelle im statischen Bereich durchgeführt. Allerdings wurde jeder Parameter nur für sich betrachtet. Interessant für die Forschung wären Weiter Versuche wie beispielweise zur dynamischen Zweipunktschwelle und Vergleiche zwischen statischer und dynamischer Zweipunktschwelle wären jedoch denkbar und sinnvoll.

Einige Einflussparameter wurden im Rahmen der durchgeführten Studien nicht untersucht und flossen daher nicht in die Gestaltungshinweise mit ein. So wurden beispielsweise keine Untersuchungen zum Einfluss der Hornhaut auf die Wahrnehmung durchgeführt. Dies könnte jedoch für gewisse Anwendungsbereiche interessant sein. Der Einsatz von DEA wäre im Bereich Bau oder Baumaschinen denkbar. Hier, und sicherlich auch in weiteren möglichen Anwendungsbereichen, ist davon auszugehen, dass die Nutzer eher verhornte Haut haben, was die Wahrnehmung und Erkennung stark beeinflussen kann (vgl. Kapitel 2.4.2).

Ebenso wurde der Einfluss der Temperatur auf die Wahrnehmung und Erkennung der Form nicht mit untersucht. Jedoch erscheint eine weitere Untersuchung hierzu sinnvoll. Gerade insofern neuartige Bedienkonzepte z. B. im Bereich der Konsumprodukte geplant sind, z. B. bei Smartphones, Tablet-PCs oder auch für sonstige Anwendungen im Außenbereich, ist davon auszugehen, dass Temperatur eine Rolle spielen kann. Denkt man an Smartphones, so werden diese gerne und oft unterwegs genutzt, um auch Wartezeiten, beispielsweise an Bushaltestellen, zu überbrücken. Gerade in der kalten Jahreszeit kann es somit zu einem Absinken der Hauttemperatur im Fingerbereich kommen, welcher die Wahrnehmung und Erkennung beeinflusst. Die in dieser Arbeit aufgestellten Gestaltungshinweise sind in einem solchen Anwendungsfall nicht mehr gültig.

Auch scheint die Untersuchung der Wahrnehmung und Erkennung bei unterschiedlichen Kantenschärfen sinnvoll. Es ist denkbar, dass die Gestaltungshinweise für andere Techniken als DEA genutzt werden oder dass DEA zukünftig bei Erreichung größerer Formtiefen stärkere Abrundungen an den Kanten aufweisen, d. h., nicht so scharfkantig sind wie in den durchgeführten Versuchen. Dann wären die ermittelten Gestaltungshinweise nicht gültig und weitere Versuche wären sinnvoll, um auch für diese Fälle Gestaltungshinweise abzuleiten.

Gleiches gilt, wie in der Diskussion beschrieben (Kapitel 6), für die Untersuchung weiterer Materialien. Sollen die Gestaltungshinweise für andere Bedienkonzepte verwendet werden, welche Materialien verwenden, die von den hier untersuchten abweichen, so sind weitere Untersuchung zur Prüfung der Übertragbarkeit der Gestaltungshinweise nötig. Dies gilt auch für Beschichtungen der DEA. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Gestaltungshinweise können jedoch gegebenenfalls als Ausgangspunkt für die Untersuchungen dienen. Abgesehen von der Untersuchung anderer Materialien an sich scheint auch die Untersuchung von Beschichtungen für die DEA Aktoren sinnvoll, da die Verwendung ohne Beschichtung nicht als sinnvoll erachtet wird. Die Sili-



---

konoberfläche wurde von den Probanden kritisiert, da sie sich unangenehm klebrig anfühlte. Auch verschmutzt sie schnell. Beschichtungen könnten beiden Nachteilen entgegenwirken.

Weiterhin blieb im Rahmen dieser Arbeit der Grad der Erfahrung der Probanden völlig unbeachtet. Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, hat die Erfahrung einen starken Einfluss auf die Wahrnehmung. Für hoch trainierte Gruppen wie beispielsweise Sehbehinderte, welche stark auf ihren Tastsinn angewiesen sind, gelten sicher andere Gestaltungsrichtlinien. Es ist davon auszugehen, dass sie die Formen bereits bei geringeren Formgrößen und -tiefen wahrnehmen und erkennen als Normalsichtige. Dies bietet Untersuchungspotenzial für die Zukunft.

Auch werden Versuche zur taktilen Zweipunktschwelle als sinnvoll erachtet, sofern eine Anwendung wie bei den beschriebenen DEA geplant ist. Zwar wurde bereits eine entsprechende Studie durchgeführt, jedoch scheinen die Ergebnisse nicht verlässlich, da die verwendeten Prototypen der DEA noch nicht 100% zuverlässig arbeiten. Daher gingen die Ergebnisse dieser Studie nicht in diese Arbeit ein. Darüber hinaus fand der Versuch nur unter Verwendung einer einzigen Frequenz statt. Es wäre jedoch möglich, dass sich bei anderen Frequenzen andere, ggf. bessere Ergebnisse erzielen lassen. Darüber hinaus ist es denkbar, dass, je nach Anwendungsfall, unterschiedliche Frequenzen bei einem Bedienkonzept zur Kodierung unterschiedlicher Informationen verwendet werden (beispielsweise zunehmende Frequenz für zunehmende Dringlichkeit, niedrige Frequenz hat informierenden Charakter wie „Eingabe erfolgreich“). Dann wäre zu prüfen, welche Rahmenbedingungen, z. B. Formgröße und -tiefe, gewählt werden müssten, um die Feedbacks an sich wahrzunehmen. Ggf. macht es dann auch Sinn, zu untersuchen, wie viel Hz Abweichung nötig sind, damit zwei Frequenzen als unterschiedlich wahrgenommen werden.

Auch wurde bisher hauptsächlich die Verwendung des Zeigefingers untersucht. Sicher wäre aber auch die Untersuchung anderer Finger sinnvoll, da es auch denkbare Anwendungsbereiche gibt, bei welchen mehrere Finger zum Einsatz kommen können, wie beispielsweise taktile Tastaturen für Touchscreens (siehe Kapitel 2.1.2). Dabei ist zu beachten, dass gegebenenfalls nicht nur die Untersuchung der Verwendung einzelner Finger Sinn macht, sondern auch die Verwendung mehrerer Finger, welche gleichzeitig zum Einsatz kommen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche erfolgten unter Idealbedingungen ohne Ablenkung. In weiteren Versuchen könnten daher auch Umgebungsbedingungen variiert werden. Dabei könnte der Nutzer von seiner Hauptaufgabe abgelenkt werden, und es könnte untersucht werden, wie sich eine Ablenkung auf die Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit der konkaven Formen auswirkt.

Um verstärkt realistische Anwendungen zu untersuchen, scheint es ebenfalls sinnvoll, verstärkt Versuche durchzuführen, die realistische Anwendungen untersuchen. Hierbei könnte es sich beispielsweise um Versuche handeln, bei welchen Aufgaben durch Unterstützung der taktilen, konkaven Formen gelöst werden müssen. Auch scheint die Durchführung weiterer Versuche mit ungeführten Bewegungen sinnvoll, da dies realistische-

---

ren Anwendungen entspricht. Dies entspricht der Untersuchung der Blindbedienung ohne Blick auf ein Bedienelement und ohne Wissen, wo sich beispielsweise eine Taste befindet.

Die Anwendung der erstellten Gestaltungshinweise ist vorerst vor allem für die Auslegung von konkaven Tasten oder Ähnlichem möglich. In der derzeitigen Form können auch genutzt werden um für existierende Technologien, welche mit konkaven Elementen arbeiten, eine Abschätzung für die Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit der Formen zu geben. Allerdings ist dies mit den Gestaltungshinweisen in der derzeitigen Form nur für Silikon, PCV, Aluminium oder Materialien mit sehr ähnlichen Materialeigenschaften möglich.

Durch weitere Untersuchungen kann der Anwendungsbereich der Gestaltungshinweise vergrößert werden. Beispielsweise können sie durch weitere Versuche ausgebaut werden, um für unterschiedlichste Materialien anwendbar zu sein. Darüber hinaus könnten dann Einflüsse der unterschiedlichsten Materialeigenschaften und deren Auswirkung auf die Wahrnehmung und Erkennung von konkaven Formen ermittelt werden, sodass zukünftig mithilfe der Gestaltungshinweise auch Materialempfehlungen gegeben werden können.

Auch können die Gestaltungshinweise durch weitere Auswertungen und gegebenenfalls weitere Versuche so ausgebaut werden, dass sie in Abhängigkeit von mehreren Parametern direkt genutzt werden können, um z. B. zu zeigen, wie Formgröße und Tiefe geändert werden müssen, um eine Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit von konkaven Formen zu gewährleisten.

Auch ein Ausbau für weitere Nutzergruppen, wie beispielsweise besonders Geübte oder Personen mit einer sehr eingeschränkten taktilen Wahrnehmung, ist denkbar. So können die Gestaltungshinweise für weitere Anwendungsbereiche nutzbar gemacht werden.

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2-1: Aufbau eines DEA, Ansicht im Ruhezustand (links) und im aktuierten Zustand (rechts) (Lotz et al., 2012).....	6
Abbildung 2-2: Aufbau eines mehrschichtigen DEA, links im Ruhezustand, rechts im aktuierten Zustand (Lotz et al., 2011).....	7
Abbildung 2-3: DEA-Steuerung für einen MP3-Player(Lotz et al., 2012).....	7
Abbildung 2-4: Multi-Touch-Display, aufgebaut aus Taxeln (Terlizzi & Minoo, 2009) .....	8
Abbildung 2-5: Beispielanwendung eines DEA: Maus mit taktilem Feedback (Mößinger et al., 2014) .....	8
Abbildung 2-6: Unterteilung der Haptik nach DIN EN ISO 9241-910:2011.....	9
Abbildung 2-7: Lage der taktilen Sensoren in den Hautschichten bei unbehaarter Haut (Zimmermann, 2005).....	10
Abbildung 2-8: Verteilung der Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung in unterschiedlichen Bereichen der Hand (R. S. Johansson & Vallbo, 1979) .....	12
Abbildung 2-9: Zweipunktschwellen unterschiedlicher Hautbereiche (Zimmermann 2005).....	16
Abbildung 2-10: Formen für die Bilderkennung in der Studie von (Gibson, 1962) .....	18
Abbildung 2-11: Reaktion eines SA-I-Rezeptors beim Abtasten von Buchstaben (Johnson & Hsiao, 1992).....	18
Abbildung 2-12: Schwellwerte für die Wahrnehmung von Schwingungen in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz nach (Hugony, 1935) .....	19
Abbildung 3-1: Schematische Zeichnung (links) und Bild (rechts) einer in Studie 1 verwendeten Versuchsplatte .....	35
Abbildung 3-2: Zoneneinteilung der Versuchsplatte in Studie zwei (1 = Ecke, 2 = Kante, 3 = Umlaufzone, 4 = Mitte), Maße in mm .....	69

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2-1:	Übersicht über die Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung mit ihren Eigenschaften .....	12
Tabelle 3-1:	Übersicht über die Studien und die im Rahmen der Studien untersuchten Parameter .....	33
Tabelle 3-2:	Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31) .....	37
Tabelle 3-3:	Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31) .....	38
Tabelle 3-4:	Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31) .....	39
Tabelle 3-5:	Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22) .....	40
Tabelle 3-6:	Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22) .....	41
Tabelle 3-7:	Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22) .....	42
Tabelle 3-8:	Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9) .....	43
Tabelle 3-9:	Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9) .....	44
Tabelle 3-10:	Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9) .....	45
Tabelle 3-11:	Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	46
Tabelle 3-12:	Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	47
Tabelle 3-13:	Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	48
Tabelle 3-14:	Wahrnehmung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15) .....	49

Tabelle 3-15:	Wahrnehmung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15).....	50
Tabelle 3-16:	Wahrnehmung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15).....	51
Tabelle 3-17:	Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31).....	52
Tabelle 3-18:	Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31).....	53
Tabelle 3-19:	Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1 (N=31).....	54
Tabelle 3-20:	Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22).....	55
Tabelle 3-21:	Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22).....	56
Tabelle 3-22:	Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden <40 Jahre (N=22).....	57
Tabelle 3-23:	Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9).....	58
Tabelle 3-24:	Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9).....	59
Tabelle 3-25:	Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, Probanden > 40 Jahre (N=9).....	60
Tabelle 3-26:	Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	61
Tabelle 3-27:	Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	62
Tabelle 3-28:	Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, männliche Probanden (N=16) .....	63
Tabelle 3-29:	Erkennung der Kreise in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15).....	64

Tabelle 3-30:	Erkennung der Quadrate in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15).....	65
Tabelle 3-31:	Erkennung der Dreiecke in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 1, weibliche Probanden (N=15).....	66
Tabelle 3-32:	Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2 (N=30) ..	71
Tabelle 3-33:	Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2, männliche Probanden (N=20) .....	72
Tabelle 3-34:	Wahrnehmung der Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe in Studie 2, weibliche Probanden (N=10).....	72
Tabelle 3-35:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3 (N=30).....	76
Tabelle 3-36:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden <40 Jahre (N=10).....	76
Tabelle 3-37:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden 40-60 Jahre (N=10) .....	77
Tabelle 3-38:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, Probanden >60 Jahre (N=10).....	77
Tabelle 3-39:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, männliche Probanden (N=15) .....	78
Tabelle 3-40:	Anzahl richtig erkannter Einzelpunkte und Punktpaare in Studie 3, weibliche Probanden (N=15).....	78
Tabelle 3-41:	Dichte, E-Modul, Härte und Wärmeleitfähigkeit für Silikon, Aluminium und PVC .....	81
Tabelle 3-42:	Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) .....	82
Tabelle 3-43:	Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden <40 Jahre (N=20).....	85
Tabelle 3-44:	Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden >40 Jahre (N=20).....	87
Tabelle 3-45:	Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20) .....	90
Tabelle 3-46:	Wahrnehmung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20).....	92

Tabelle 3-47:	Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4 (N=40) .....	94
Tabelle 3-48:	Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, Probanden <40 Jahre (N=20).....	97
Tabelle 3-49:	Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, , Probanden >40 Jahre (N=20).....	100
Tabelle 3-50:	Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, männliche Probanden (N=20) .....	102
Tabelle 3-51:	Erkennung der Formen bei Silikon, PVC und Aluminium in Studie 4, weibliche Probanden (N=20).....	105
Tabelle 4-7:	Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für Kreise, Quadrate und Dreiecke .....	110
Tabelle 4-8:	Ergebnisse Kruskal-Wallis-Test für Untersuchung des Formeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung .....	110
Tabelle 4-1:	Anzahl wahrgenommener und erkannter Formen in Abhängigkeit von Formgröße und –tiefe .....	111
Tabelle 4-3:	Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für die Altersgruppen <40 Jahre und ≥40 Jahre..	112
Tabelle 4-4:	Ergebnisse Mann-Whitney-U-Test für Untersuchung des Alterseinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung .....	112
Tabelle 4-5:	Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für männliche und weibliche Probanden.....	113
Tabelle 4-6:	Ergebnisse Mann-Whitney-U-Test für Untersuchung des Geschlechtseinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung .....	113
Tabelle 4-9:	Mediane und Standardabweichungen der benötigten Formgröße für Formwahrnehmung bzw. Formerkennung für die Materialien Silikon, PVC und Aluminium.	114
Tabelle 4-10:	Ergebnisse Kruskal-Wallis-Test für Untersuchung des Materialeinflusses auf die Formwahrnehmung und –erkennung .....	114
Tabelle 4-11:	Ergebnisse des Paarvergleiches der Materialien mittels des Mann-Whitney-U-Tests .....	115
Tabelle 4-12:	Kumulierte Anzahl und kumulierte % wahrgenommener bzw. erkannter Formen für die Formtiefen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm .....	116

---

Tabelle 4-13:	Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse .....	117
Tabelle 5-1:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 100 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht) .....	122
Tabelle 5-2:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 95 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht.....	123
Tabelle 5-3:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 90 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht.....	124
Tabelle 5-4:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 80 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht.....	125
Tabelle 5-5:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 70 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht.....	126
Tabelle 5-6:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 60 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht.....	127
Tabelle 5-7:	Gestaltungshinweise für eine Wahrnehmungs- und Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % (alle Maße in mm; n.u.: wurde nicht untersucht, –: wurde nicht erreicht) .....	128



---

## Abkürzungsverzeichnis

---

BMBF	–	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DEA	–	Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren
EMK	–	Institut für Elektromechanische Konstruktionen
FA	–	Fast Adapting
IAD	–	Institut für Arbeitswissenschaft Darmstadt
IDD	–	Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
SA	–	Slowly Adapting

---

## Literaturverzeichnis

---

- Ballesteros, S., & Heller, M. A. (2008). Haptic object identification. In M. Grunwald (Ed.), *Human Haptic Perception: Basics and Applications* (pp. 207–222). Birkhäuser Basel. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3\\_16](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3_16)
- Ballesteros, S., Millar, S., & Reales, J. M. (1998). Symmetry in haptic and in visual shape perception. *Perception & Psychophysics*, 60(3), 389–404.
- Bergmann Tiest, W. M., & Kappers, A. M. L. (2006). Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility. *Acta Psychologica*, 121(1), 1–20. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.04.005>
- Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (2005). *Biologische Psychologie* (Auflage: 6., vollst. überarb. u. ergänzte Aufl.). Springer.
- Bolanowski, S. J., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., & Checkosky, C. M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1680–1694.
- Bortz, J. (2005). *Statistik: Für Human- und Sozialwissenschaftler* (Auflage: 6., vollst. überarb. u. aktualisierte Aufl.). Berlin; Heidelberg; New York: Springer.
- Caldwell, D. G., Lawther, S., & Wardle, A. (1996). Multi-modal cutaneous tactile feedback. In *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96* (Vol. 2, pp. 465–472 vol.2). <http://doi.org/10.1109/IROS.1996.570820>
- Craig, J. C., & Sherrick, C. E. (1969). The role of skin coupling in the determination of vibrotactile spatial summation. *Perception & Psychophysics*, 6(2), 97–101. <http://doi.org/10.3758/BF03210689>
- Eisele, E. (2010). Wahrnehmung schwelennaher taktiler Vibrationsreize. Retrieved from <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/45765>
- Gescheider, G. A., & Verrillo, R. T. (1979). Vibrotactile Frequency Characteristics as Determined by Adaptation and Masking Procedures. In D. R. Kenshalo (Ed.), *Sensory Functions of the Skin of*

- 
- Humans* (pp. 183–205). Springer US. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-3039-4\\_10](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-3039-4_10)
- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477–491.  
<http://doi.org/10.1037/h0046962>
- Goldreich, D., & Kanics, I. M. (2006). Performance of blind and sighted humans on a tactile grating detection task. *Perception & Psychophysics*, 68(8), 1363–1371.
- Goldstein, E. B. (2007). *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*. (H. Irtel, Ed., G. Plata, Trans.) (Auflage: 7. Aufl. 2007). Spektrum Akademischer Verlag.
- Goodwin, A. W., John, K. T., & Marceglia, A. H. (1991). Tactile discrimination of curvature by humans using only cutaneous information from the fingerpads. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 86(3), 663–672.
- Grunwald, M. (Ed.). (2008). *Human Haptic Perception: Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser Basel. Retrieved from <http://www.springerlink.com/content/978-3-7643-7612-3#section=232013&page=3&locus=14>
- Grunwald, M., & Beyer, L. (2001). *Der Bewegte Sinn: Grundlagen Und Anwendungen Zur Haptischen Wahrnehmung* (Auflage: 2001). Springer.
- Hahn, John F. (1968). Tactile Adaptation. In *The skin senses: proceedings*. Thomas.
- Hahn, John F. (1973). Vibratory adaptation. In Geldard, Frank (Ed.), *Cutaneous communication systems and devices*. Psychonomic Society.
- Halata, Z., & Baumann, K. I. (2008). Anatomy of receptors. In M. Grunwald (Ed.), *Human Haptic Perception: Basics and Applications* (pp. 85–92). Birkhäuser Basel. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-7612-3_6)
- Hall, K. L., Hoffman, K. E., Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., & Verrillo, R. T. (1994). The effects of aging on vibrotactile threshold in glabrous skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(5), 2831–2831. <http://doi.org/10.1121/1.409623>

- 
- Hollins, M., Bensmaïa, S., Karlof, K., & Young, F. (2000). Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling. *Perception & Psychophysics*, 62(8), 1534–1544. <http://doi.org/10.3758/BF03212154>
- Hsin-Yun Yao, V. H. (2005). A tactile enhancement instrument for minimally invasive surgery. *Computer Aided Surgery : Official Journal of the International Society for Computer Aided Surgery*, 10(4), 233–9. <http://doi.org/10.3109/10929080500230403>
- Hugony, A. (1935). Über die Empfindung von Schwingungen mittels des Tastsinnes, (96), 548–553.
- immersion. (n.d.). Immersion Corporation – Haptics for the Digital User Experience. Retrieved August 20, 2014, from <http://www.immersion.com/index.html>
- Johansson, R. S., & LaMotte, R. H. (1983). Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface. *Somatosensory Research*, 1(1), 21–31.
- Johansson, R. S., & Vallbo, A. B. (1979). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of Physiology*, 286, 283–300.
- Johansson, R. S., & Vallbo, A. B. (1980). Spatial properties of the population of mechanoreceptive units in the glabrous skin of the human hand. *Brain Research*, 184(2), 353–366.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. (1983). Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, 6, 27–32. [http://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90011-5](http://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90011-5)
- Johnson, K. O., & Hsiao, S. S. (1992). Neural Mechanisms of Tactual form and Texture Perception. *Annual Review of Neuroscience*, 15(1), 227–250. <http://doi.org/10.1146/annurev.ne.15.030192.001303>
- Jones, L. A., & Berris, M. (2002). The Psychophysics of Temperature Perception and Thermal-Interface Design. In *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 137–142). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=795682.797526>

- 
- Jones, L. A., & Berris, M. (2003). Material discrimination and thermal perception. In *11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings* (pp. 171–178). <http://doi.org/10.1109/HAPTIC.2003.1191267>
- Junqueira, L. C. U., Carneiro, J., Gratzl, M., Mayerhofer, A., Schilling, K., Richter, W., & Wurziger, L. J. (2004). *Histologie: Neue Approbationsordnung* (Auflage: 6. Aufl. 2005). Springer.
- Katz, D. (1969). *Der Aufbau der Tastwelt*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Kenshalo, D. R. (1986). Somesthetic sensitivity in young and elderly humans. *Journal of Gerontology*, 41(6), 732–742.
- Kern, T. A. (Ed.). (2009). *Entwicklung Haptischer Geräte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://www.springerlink.com/content/v06p14/#section=131790&page=1>
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1999). Tactile roughness perception with a rigid link interposed between skin and surface. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 591–607. <http://doi.org/10.3758/BF03205532>
- Klatzky, R. L., Lederman, S., & Reed, C. (1989). Haptic integration of object properties: texture, hardness, and planar contour. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 15(1), 45–57.
- Klinke, R., & Silbernagl, S. (2001). *Lehrbuch der Physiologie*. Thieme, Stuttgart.
- Kremp, M. (2008, September 7). Tastaturinnovation: Das Handy mit dem Haptik-Trick. *Spiegel Online*. Retrieved from <http://www.spiegel.de/netzwelt/mobil/tastaturinnovation-das-handy-mit-dem-haptik-trick-a-564263.html>
- Lakatos, S., & Marks, L. E. (1999). Haptic form perception: relative salience of local and global features. *Perception & Psychophysics*, 61(5), 895–908.
- LaMotte, Robert H., & Srinivasan, Mandayam A. (1991). Surface microgeometry: Tactile perception and neural encoding. In *Information Processing in the Somatosensory System*. Palgrave Macmillan.
- Lawther, S. (1995). *Thermal and textural feedback for telepresence*. Salford: University of Salford.

- 
- Lederman, S. J. (1974). Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 385–395.  
<http://doi.org/10.3758/BF03203958>
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: a tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71(7), 1439–1459. <http://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
- Lederman, S. J., & Taylor, M. M. (1972). Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch. *Perception & Psychophysics*, 12(5), 401–408.  
<http://doi.org/10.3758/BF03205850>
- Legge, G. E., Madison, C., Vaughn, B. N., Cheong, A. M. Y., & Miller, J. C. (2008). Retention of high tactile acuity throughout the life span in blindness. *Perception & Psychophysics*, 70(8), 1471–1488. <http://doi.org/10.3758/PP.70.8.1471>
- Library of Congress (Ed.). (2008). Braille Books and Pamphlets library of congress. Retrieved from [http://www.loc.gov/nls/specs/800\\_march5\\_2008.pdf](http://www.loc.gov/nls/specs/800_march5_2008.pdf)
- Locher, P. J., & Simmons, R. W. (1978). Influence of stimulus symmetry and complexity upon haptic scanning strategies during detection, learning, and recognition tasks. *Perception & Psychophysics*, 23(2), 110–116. <http://doi.org/10.3758/BF03208290>
- Loomis, J., & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. In *Handbook of Perception and Human Performance* (Vol. Volume II). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Lotz, P., Flittner, K., Haus, H., & Schlaak, H. F. (2012). Dielektrische elektroaktive Polymere für strukturintegrierte Aktorik und Sensorik. *tm - Technisches Messen*, 79(7-8), 374–381.  
<http://doi.org/10.1524/teme.2012.0235>
- Lotz, P., Matysek, M., & Schlaak, H. F. (2011). Fabrication and Application of Miniaturized Dielectric Elastomer Stack Actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(1), 58–66.  
<http://doi.org/10.1109/TMECH.2010.2090164>
- Louw, S., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (2000). Haptic detection thresholds of Gaussian profiles over the whole range of spatial scales. *Experimental Brain Research*, 132(3), 369–374.  
<http://doi.org/10.1007/s002210000350>

- 
- Louw, S., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (2002). Active haptic detection and discrimination of shape. *Perception & Psychophysics*, 64(7), 1108–1119.
- Matysek, M. (2010, January 21). *Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays* (phd). TU Darmstadt. Retrieved from <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2030/>
- Matysek, M., Haus, H., Moessinger, H., Brokken, D., Lotz, P., & Schlaak, H. F. (2011). <title>Combined driving and sensing circuitry for dielectric elastomer actuators in mobile applications</title> In Y. Bar-Cohen & F. Carpi (Eds.), (pp. 797612–797612–11). <http://doi.org/10.1117/12.879438>
- Menche, N. (2007). *Biologie Anatomie Physiologie: Kompaktes Lehrbuch für Pflegeberufe von Menche. Nicole* (Auflage: 6). Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH.
- Miyaoka, T., Mano, T., & Ohka, M. (1999). Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(4), 2485–2492.
- Mößinger, H. (2010, September 7). Demonstrating the application of dielectric polymer actuators for tactile feedback in a mobile consumer device [Master Thesis]. Retrieved June 24, 2014, from <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/55996/>
- Mößinger, H., Haus, H., Kauer, M., & Schlaak, H. F. (2014). Tactile feedback to the palm using arbitrarily shaped DEA. In *Proceedings of SPIE* (Vol. 9056). San Diego, US. Retrieved from <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/65067/>
- Nolan, C. Y., & Morris, J. E. (1971). Improvement of Tactual Symbols for Blind Children. Final Report. Retrieved from <http://eric.ed.gov/?id=ED070228>
- Norman, J. F., Kappers, A. M. L., Beers, A. M., Scott, A. K., Norman, H. F., & Koenderink, J. J. (2011). Aging and the haptic perception of 3D surface shape. *Attention, Perception & Psychophysics*, 73(3), 908–918. <http://doi.org/10.3758/s13414-010-0053-y>
- Peters, I. B., Kuska, S., Kerkhoff, E., Wulfhorst, B., & Lenders, L. (2009). *Kosmetik. Das Buch zum Beruf*. (4. Auflage). Bildungsv Verlag EINS.

- 
- Phillips, J. R., & Johnson, K. O. (1981). Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. *Journal of Neurophysiology*, 46(6), 1177–1192.
- Picard, D., Dacremont, C., Valentin, D., & Giboreau, A. (2003). Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Psychologica*, 114(2), 165–184.
- Reisinger, J. (2009). *Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen*. Technische Universität München. Retrieved from <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=654165>
- Schmidt, R. F., & Lang, F. (Eds.). (2005). *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://www.springerlink.com/content/x86950/#section=321065&page=1>
- Sears, A. (1991). Improving Touchscreen Keyboards: Design issues and a comparison with other devices. *Computers*, 3, 253–269.
- Silbernagl, S. (2007). *Taschenatlas der Physiologie* (Auflage: 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Thieme.
- Statista. (2014). Tablets - Absatz in Deutschland bis 2014 | Statistik. Retrieved July 3, 2014, from <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/157928/umfrage/absatz-von-tablet-pcs-in-deutschland/>
- Stevens, J. C., & Choo, K. K. (1996). Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span. *Somatosensory & Motor Research*, 13(2), 153–166. <http://doi.org/10.3109/08990229609051403>
- Taylor, M. M., & Lederman, S. J. (1975). Tactile roughness of grooved surfaces: A model and the effect of friction. *Perception & Psychophysics*, 17(1), 23–36. <http://doi.org/10.3758/BF03203993>
- Terlizzi, J. J., & Minoo, J. (2009, July 2). Multi-touch display screen with localized tactile feedback.
- Van der Horst, B. J., & Kappers, A. M. L. (2008). Haptic curvature comparison of convex and concave shapes. *Perception*, 37(8), 1137–1151.
- Verrillo, R. T. (1985). Psychophysics of vibrotactile stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 225–232. <http://doi.org/10.1121/1.392263>



- 
- Weber, B., Schatzle, S., Hulin, T., Preusche, C., & Deml, B. (2011). Evaluation of a vibrotactile feedback device for spatial guidance. In *2011 IEEE World Haptics Conference (WHC)* (pp. 349–354). <http://doi.org/10.1109/WHC.2011.5945511>
- Woodward, K. L. (1993). The relationship between skin compliance, age, gender, and tactile discriminative thresholds in humans. *Somatosensory & Motor Research*, 10(1), 63–67. <http://doi.org/10.3109/08990229309028824>
- Zimmermann, M. (2005). Das somatoviszzerale sensorische System. In R. F. Schmidt, F. Lang, & G. Thews† (Eds.), *Physiologie des Menschen* (pp. 295–316). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://www.springerlink.com/content/p1j3100p1mk6l688/abstract/>

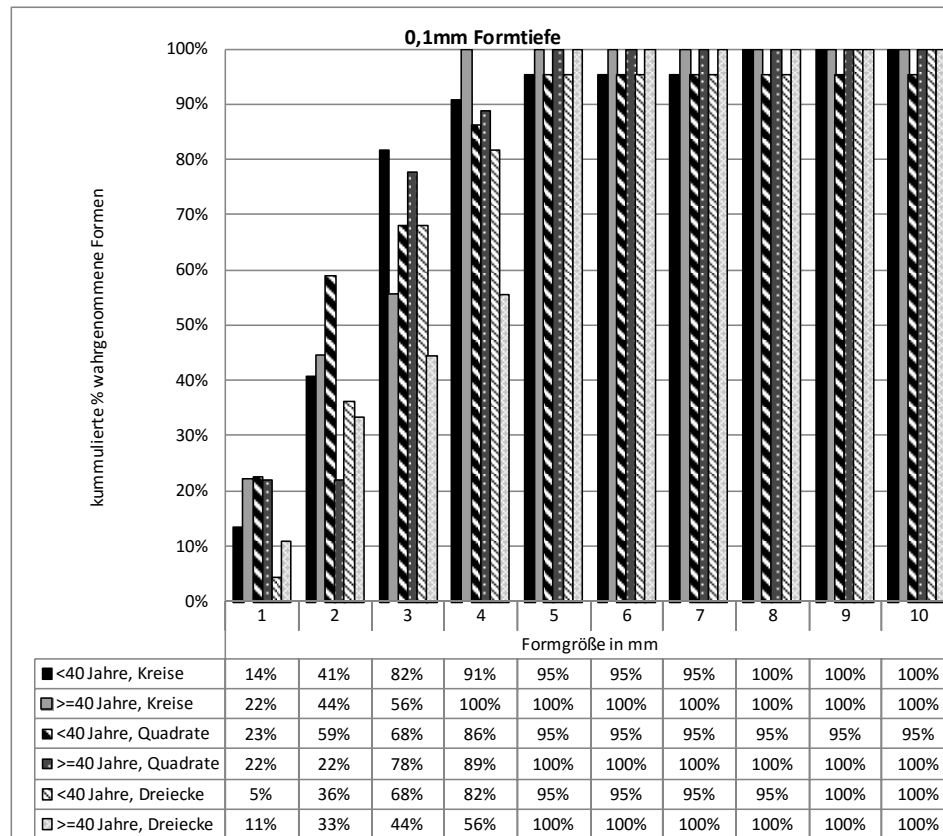
### Studentische Arbeiten

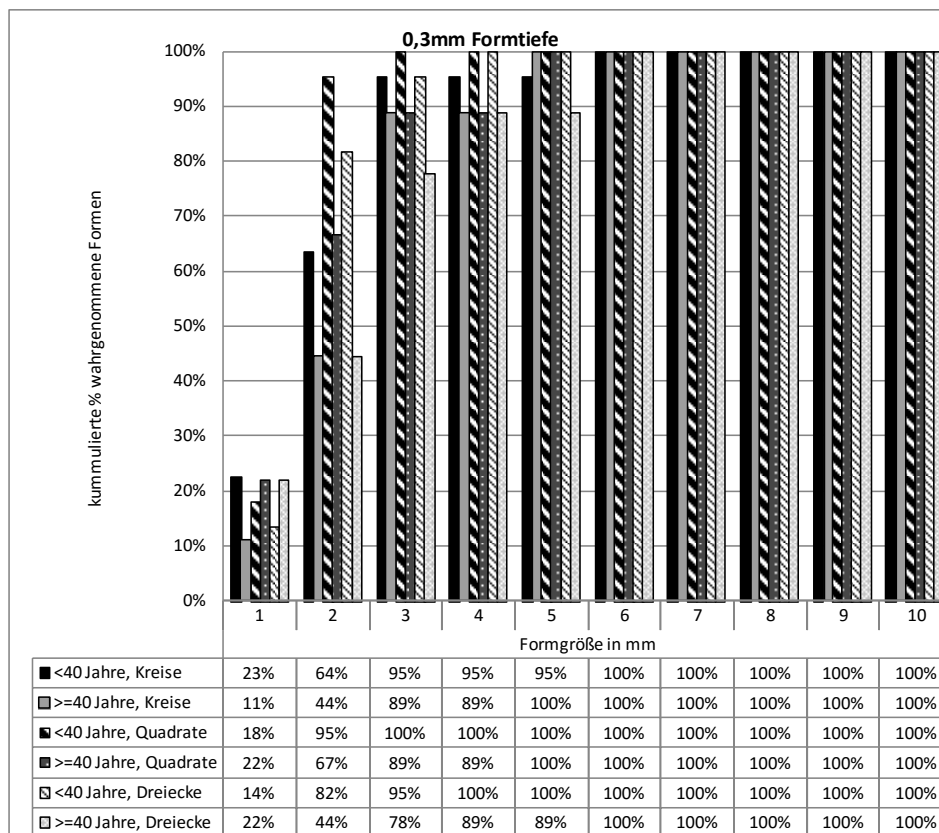
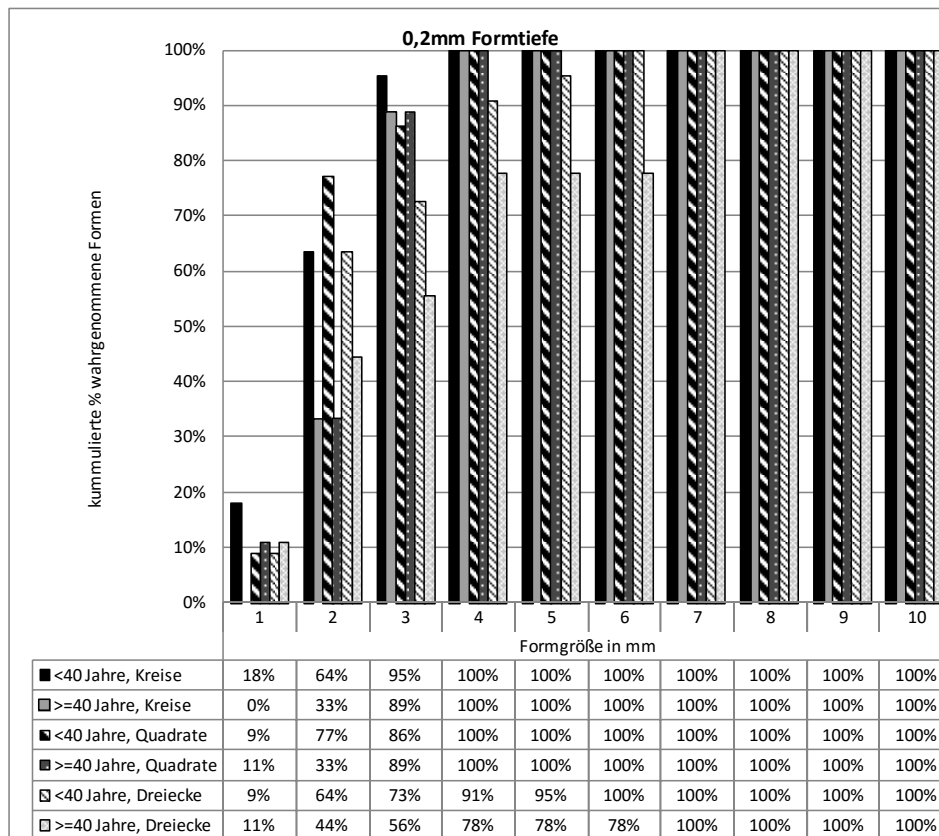
- Jäger, Marc und Röse, Thorsten (2012). *Einfluss von Materialeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit auf die Wahrnehmung konkaver, taktiler Rückmeldungen*. Advanced Design Project, Technische Universität Darmstadt.
- Klug, Florian (2012). *Untersuchung der taktilen Wahrnehmung bei der Verwendung dielektrischer Elastomer-Stapelaktoren*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt.
- Mendjargal, Tulga (2012). *Untersuchung der Wahrnehmung konkaver taktiler Rückmeldungen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt.
- Namdar, Navid (2013). *Untersuchung der statischen Zweipunkt-Diskrimination konkaver Eindrücke bei Verwendung von Silikon-Testkörpern*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt.
- Röse, Thorsten (2012). *Untersuchung der Wahrnehmung und der Erkennung konkaver, taktiler Rückmeldungen*. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Theodore, Robby (2012). *Untersuchung des Einflusses definierter Parameter auf die Wahrnehmung konkaver taktiler Rückmeldungen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt.

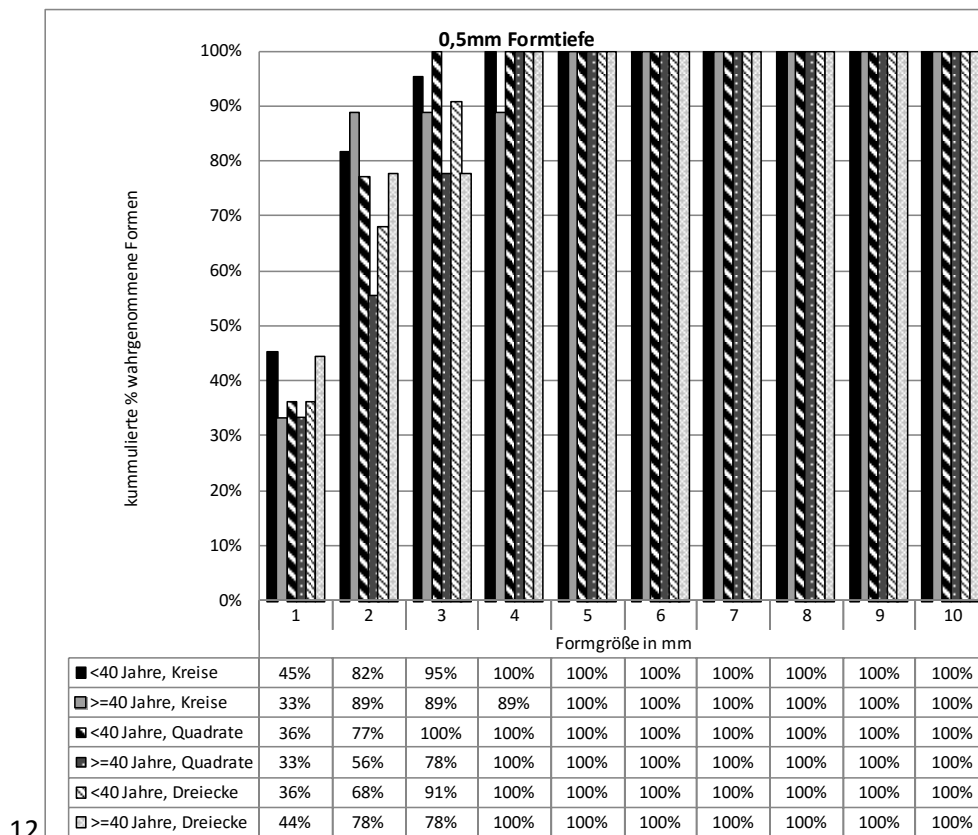
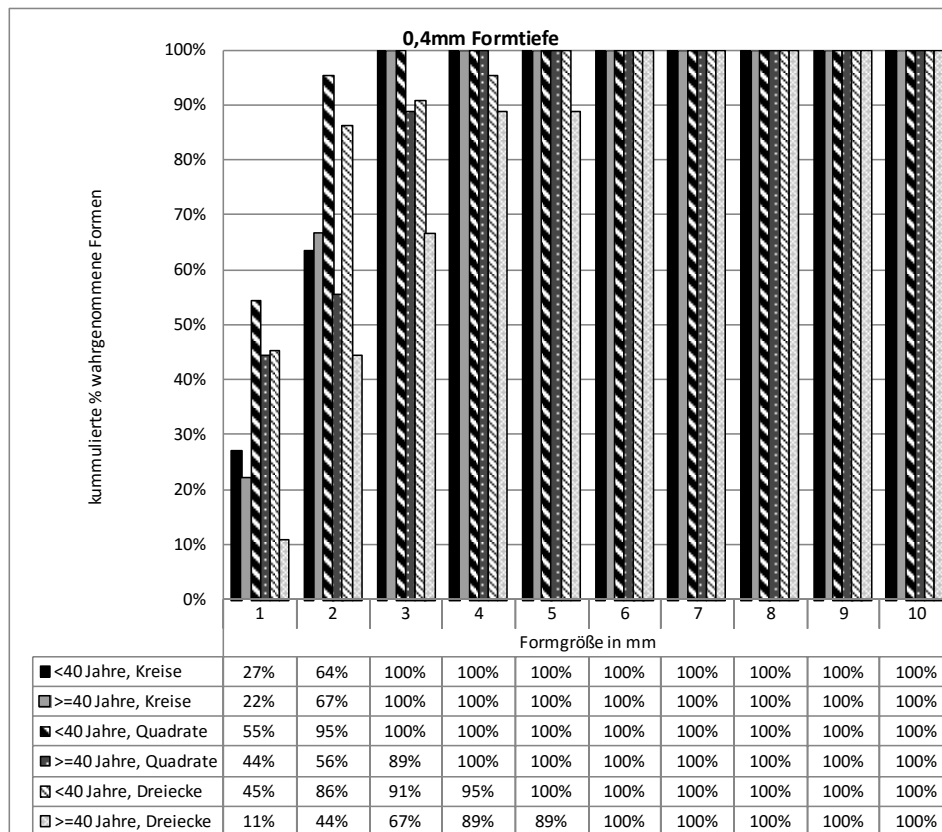
## Anhang

### A.1. Diagramme zu Studie 1

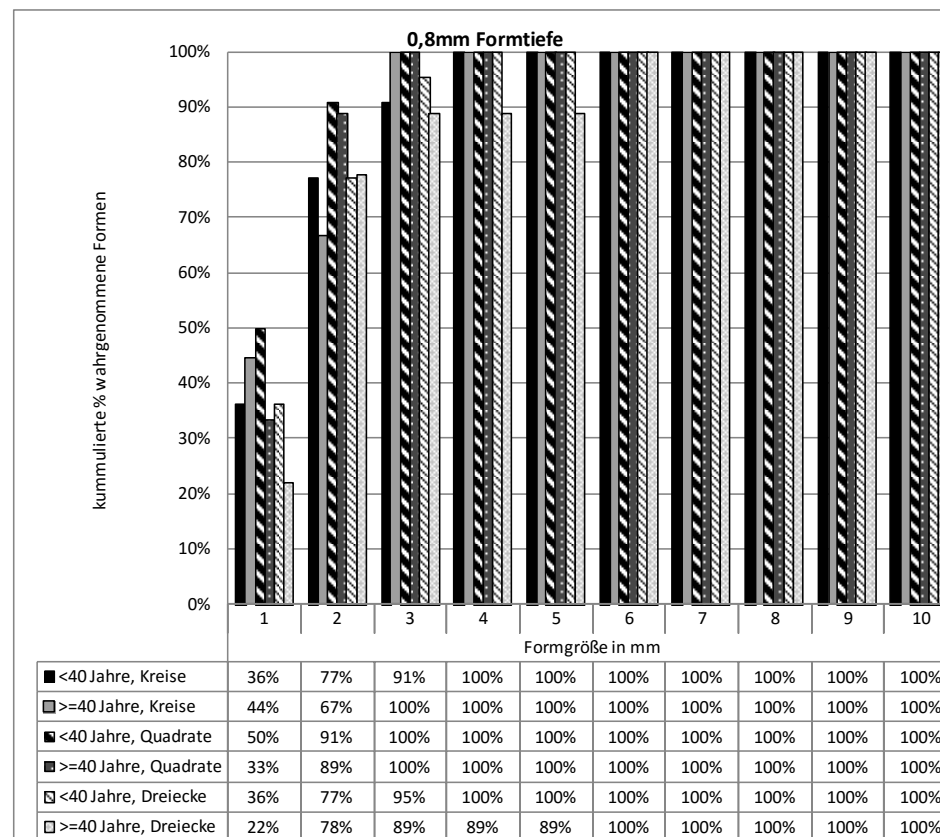
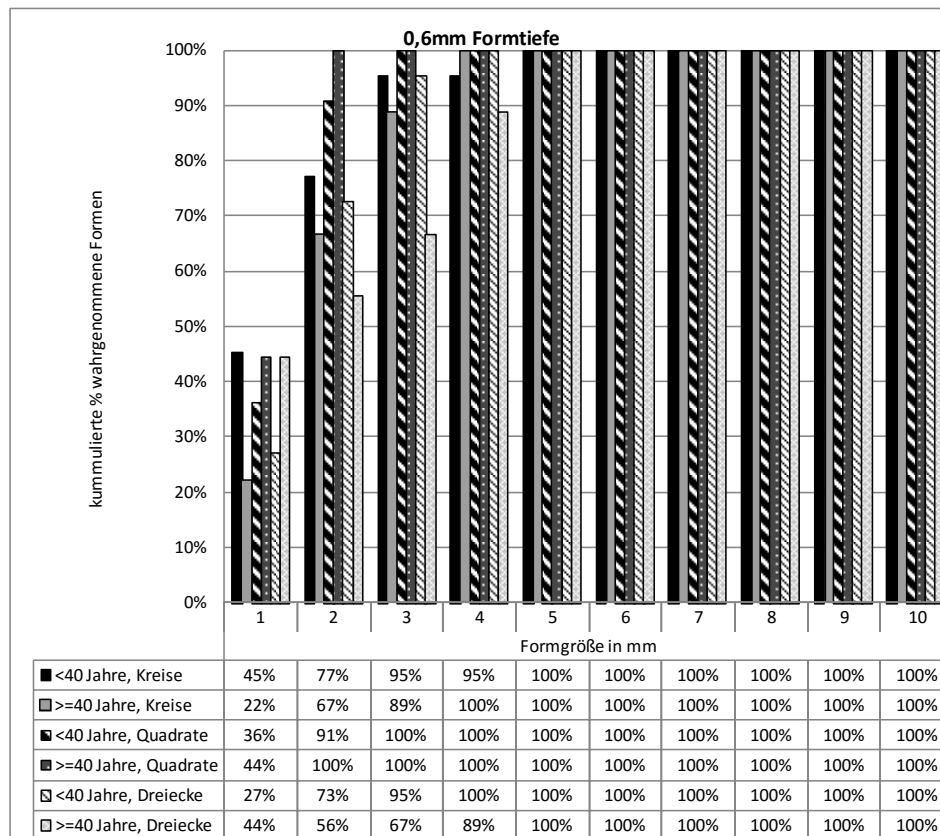
#### A.1.1. Wahrgenommene Formen nach Altersgruppen

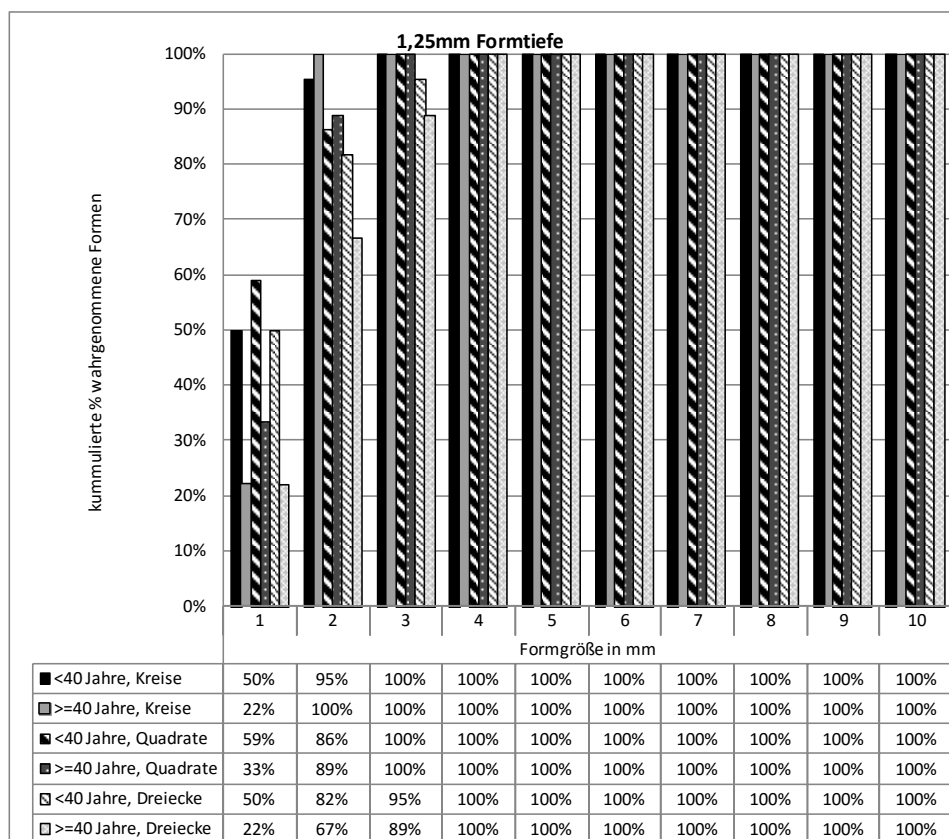
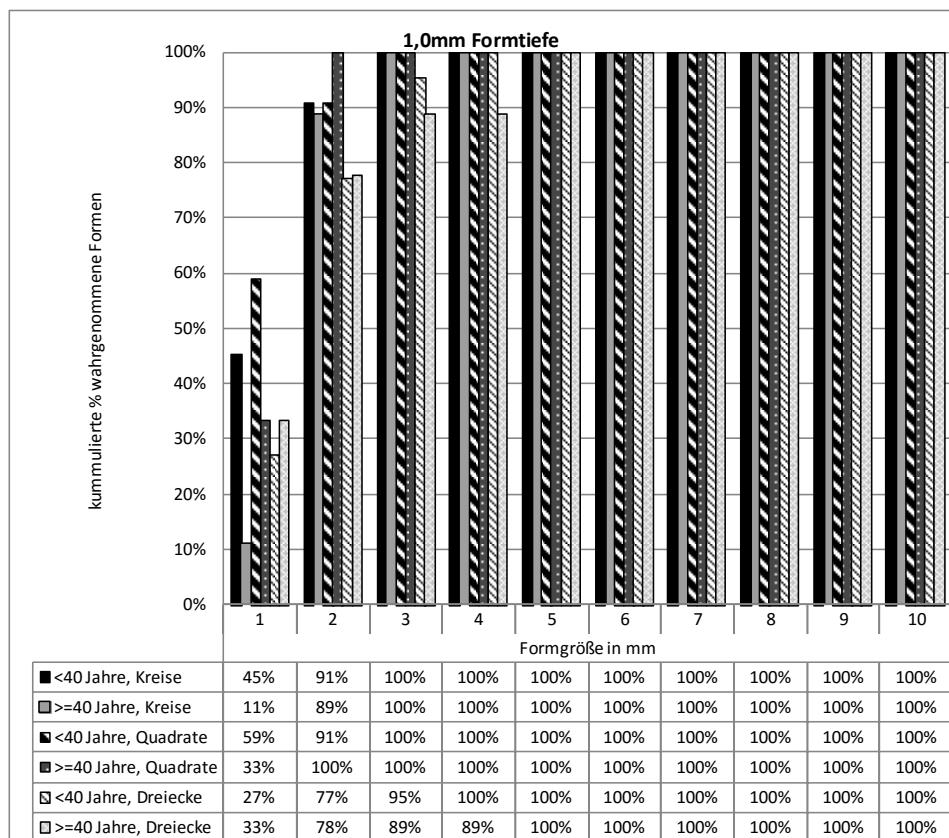


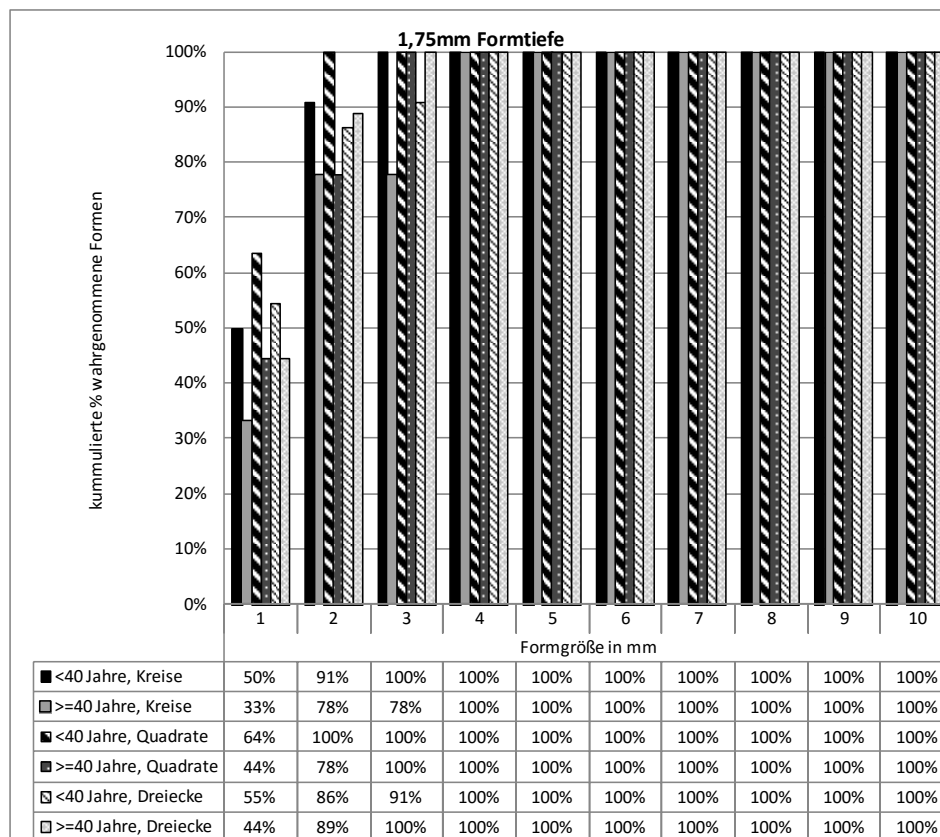
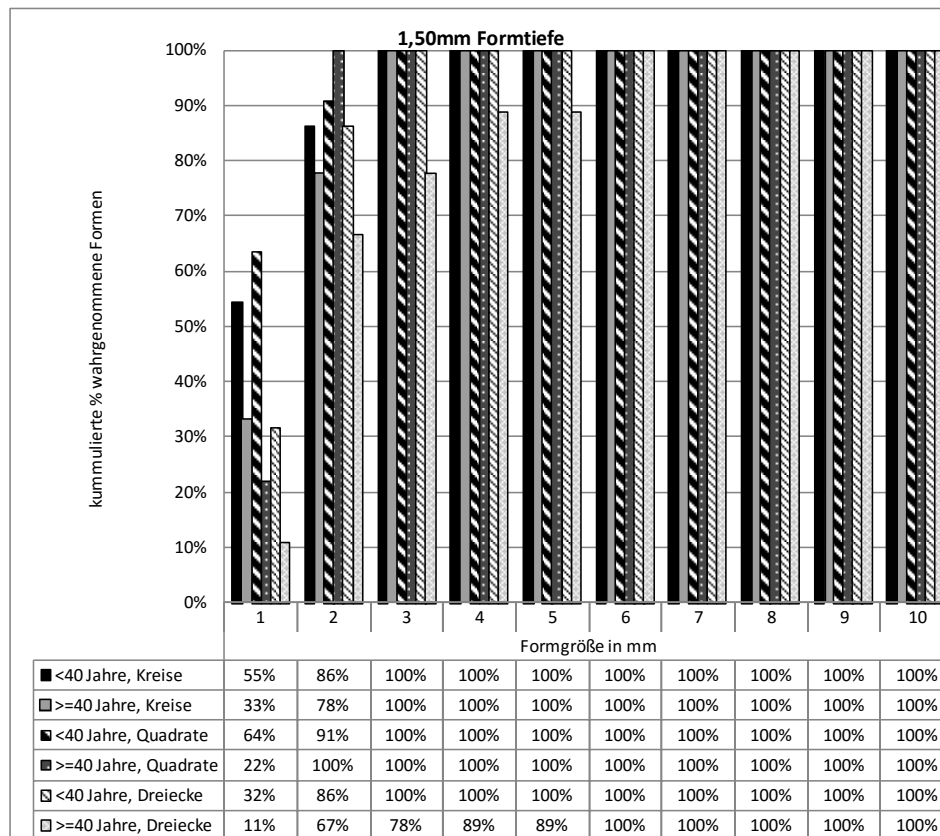


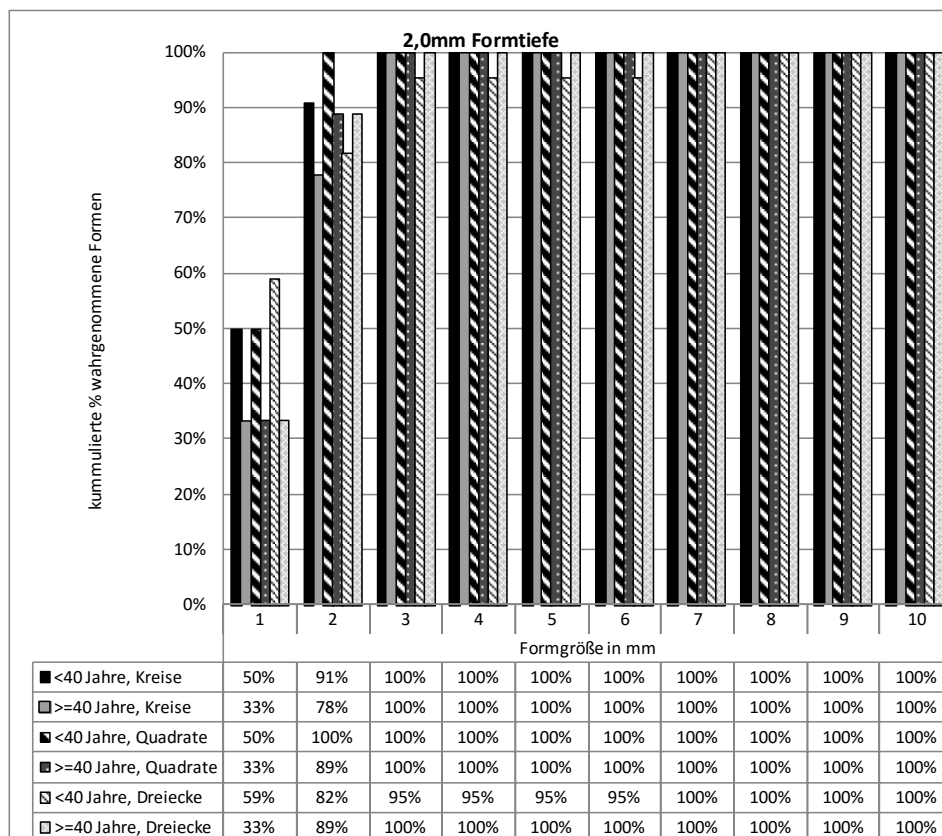


12

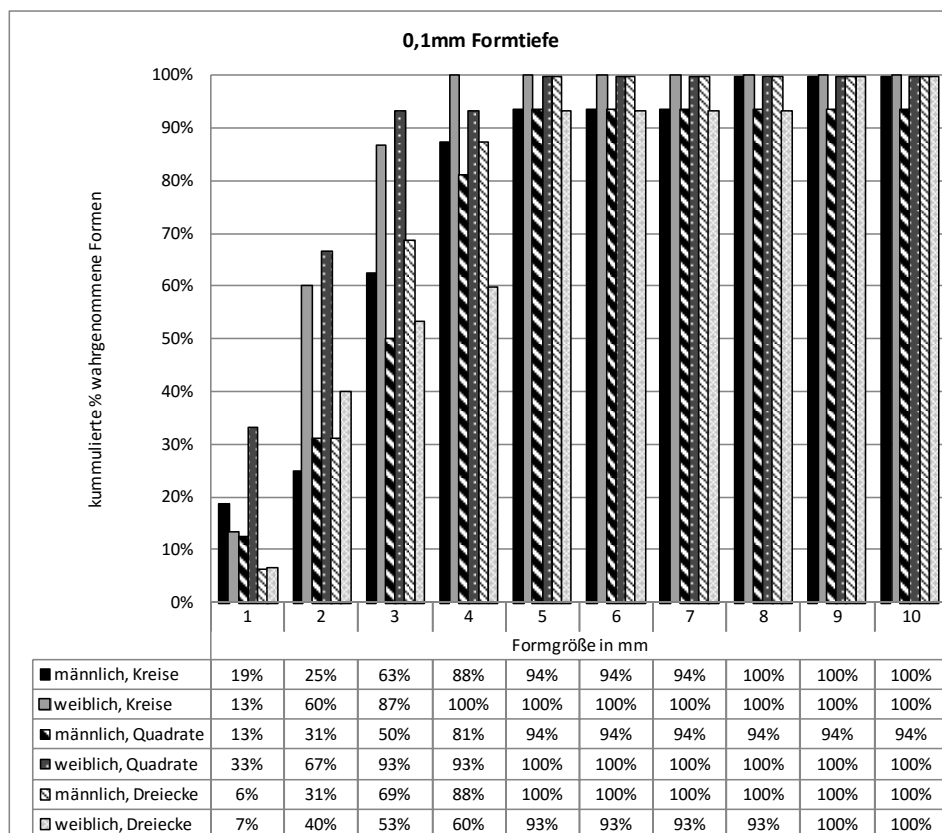




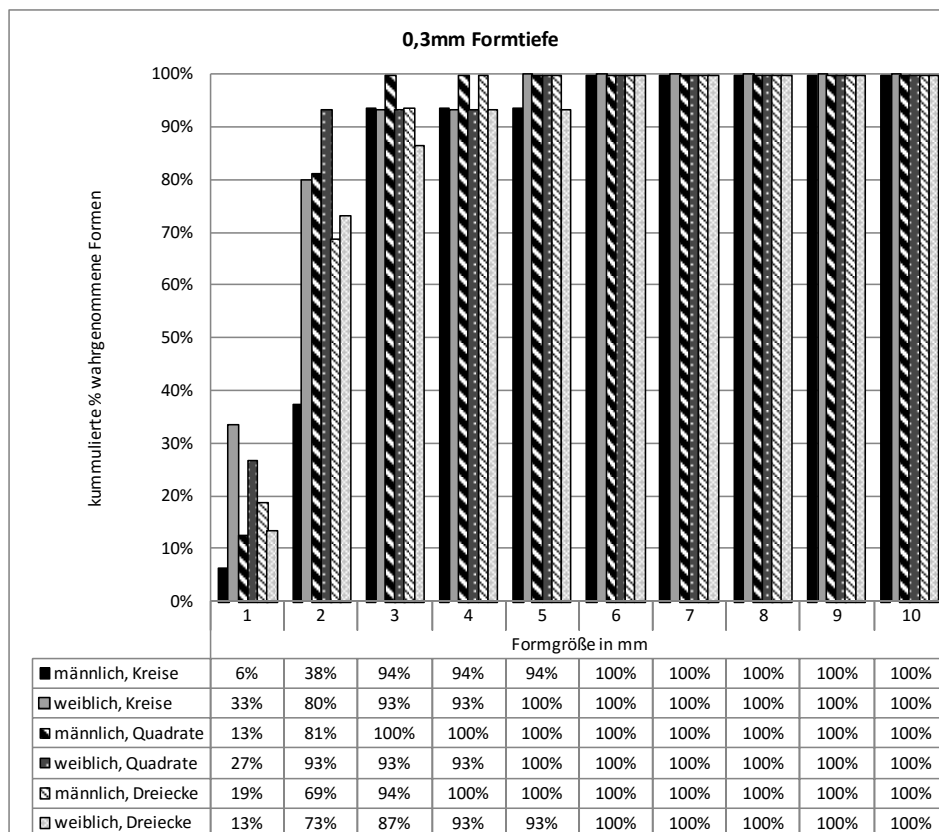
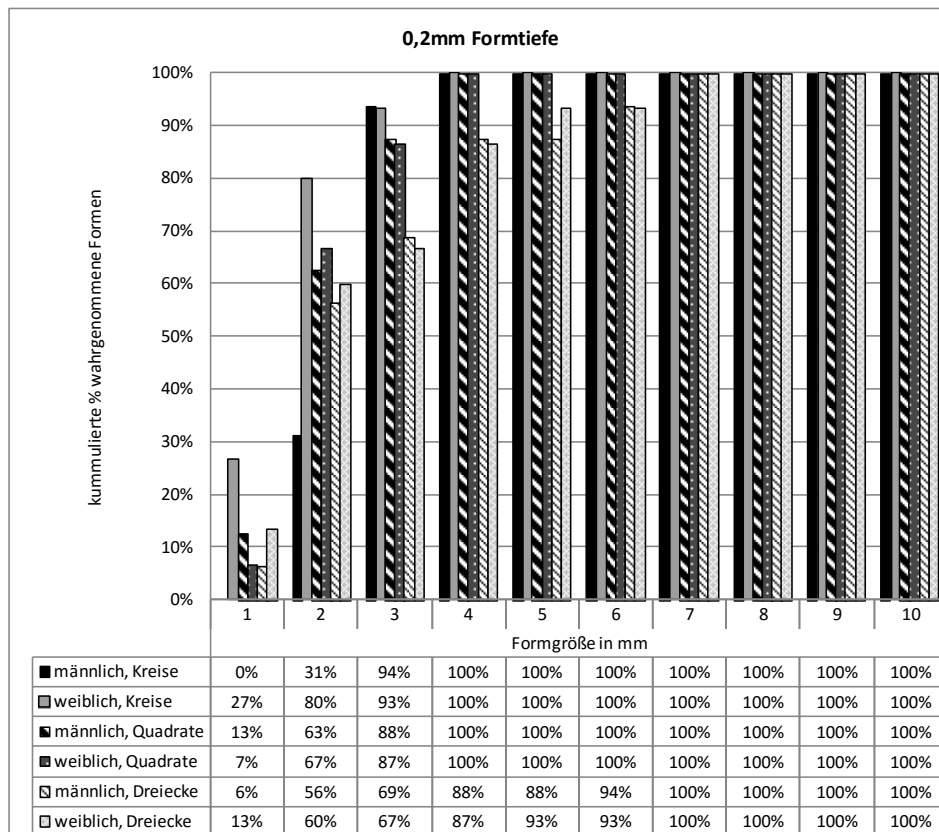


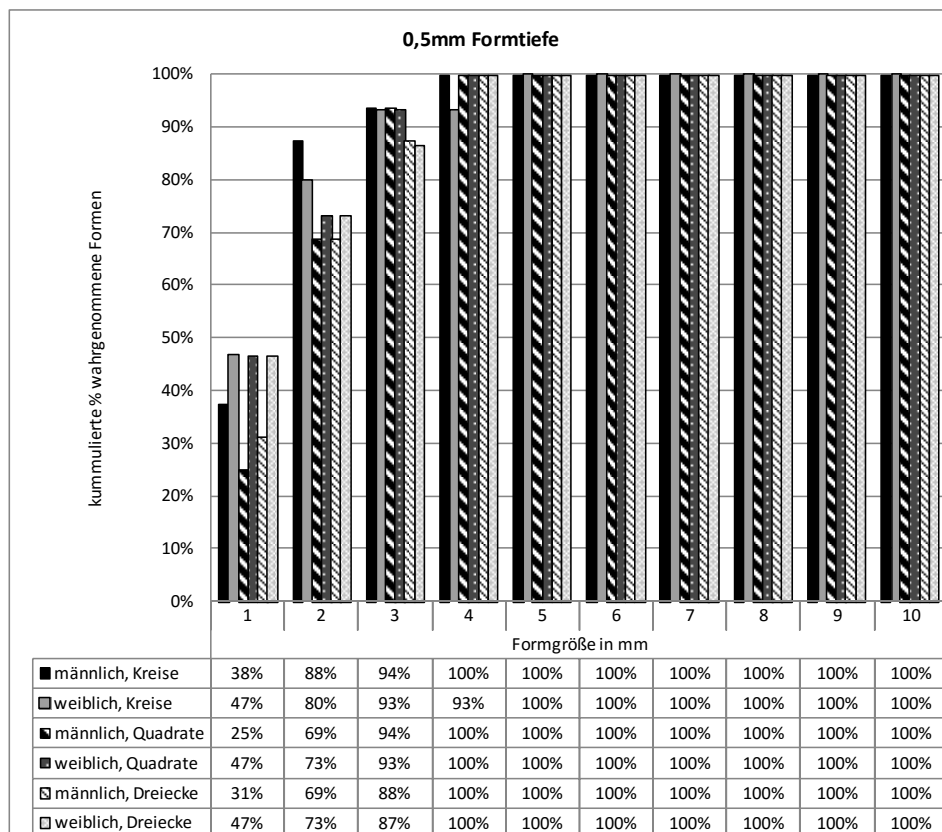
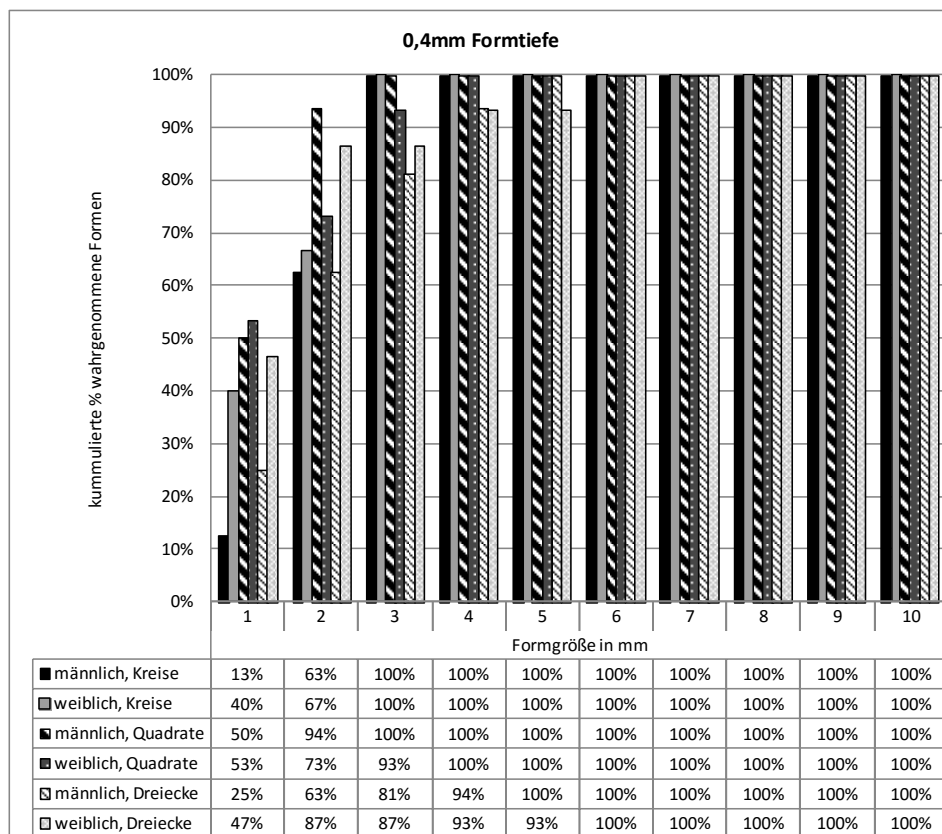


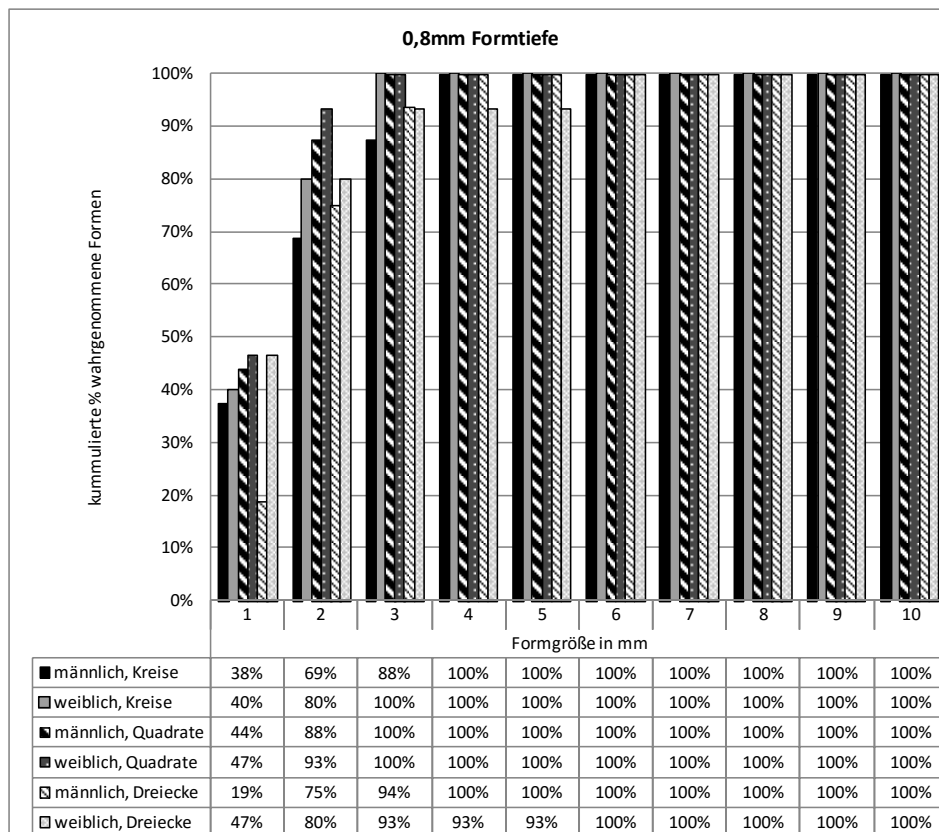
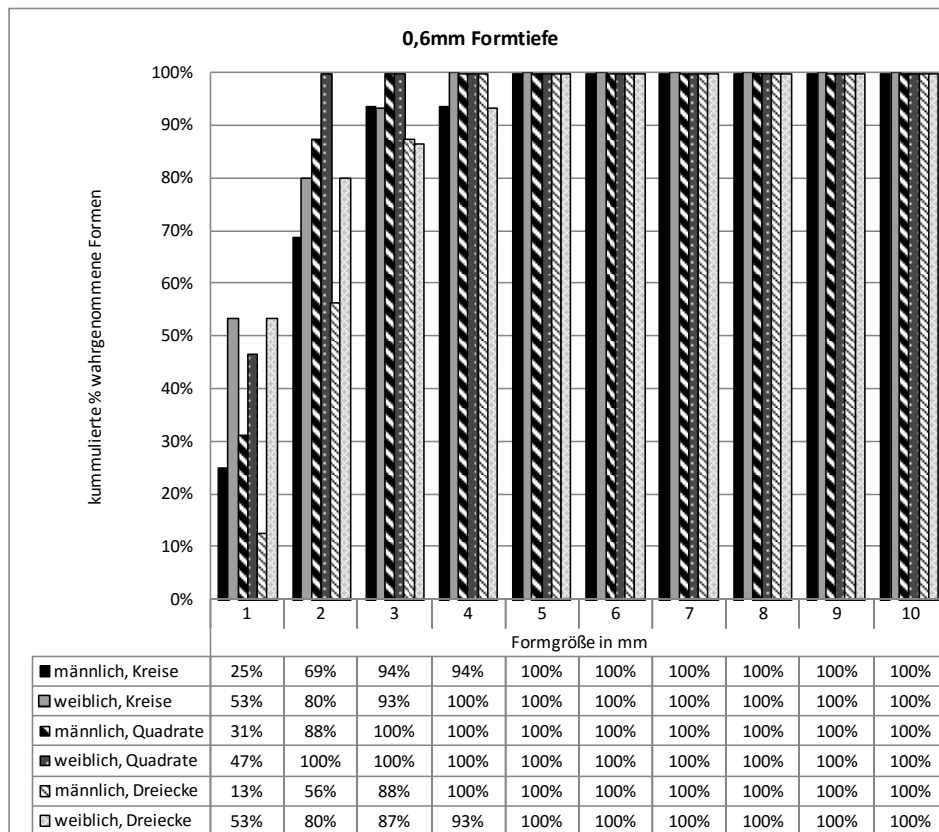
### A.1.2. Wahrgenommene Formen nach Geschlecht

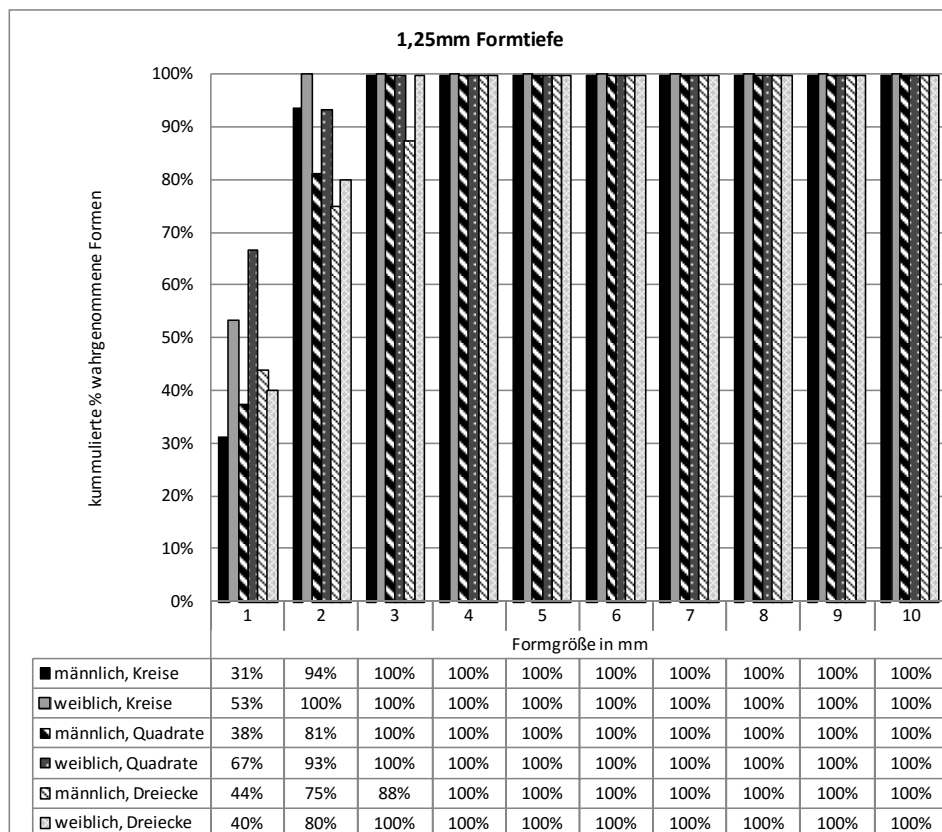
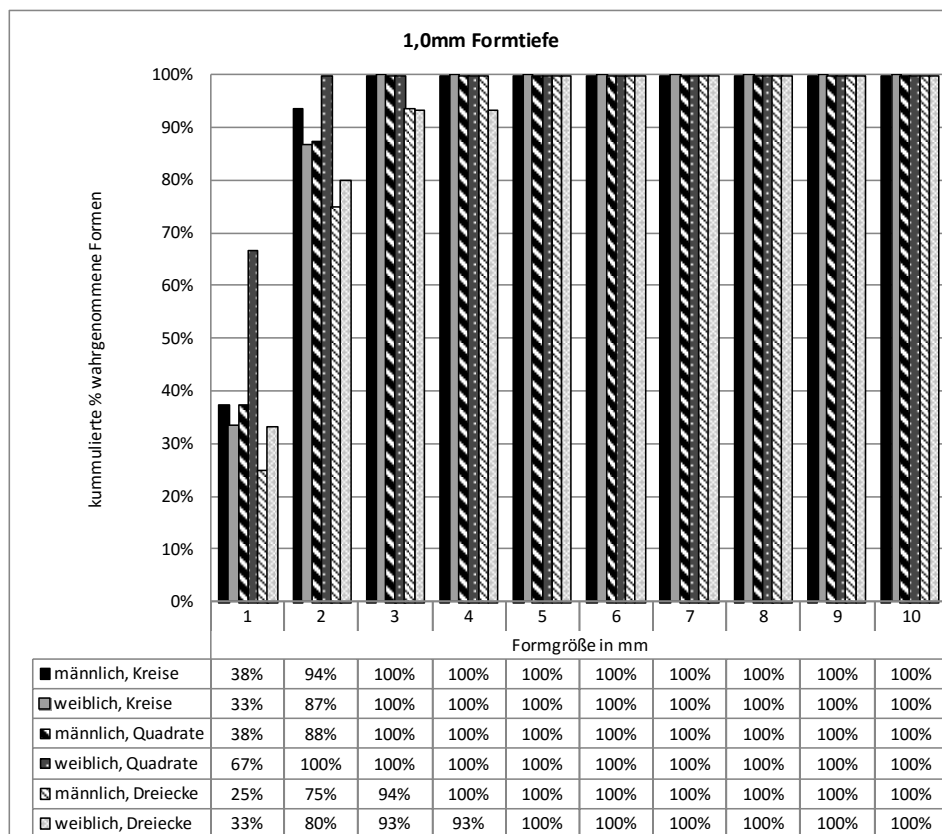


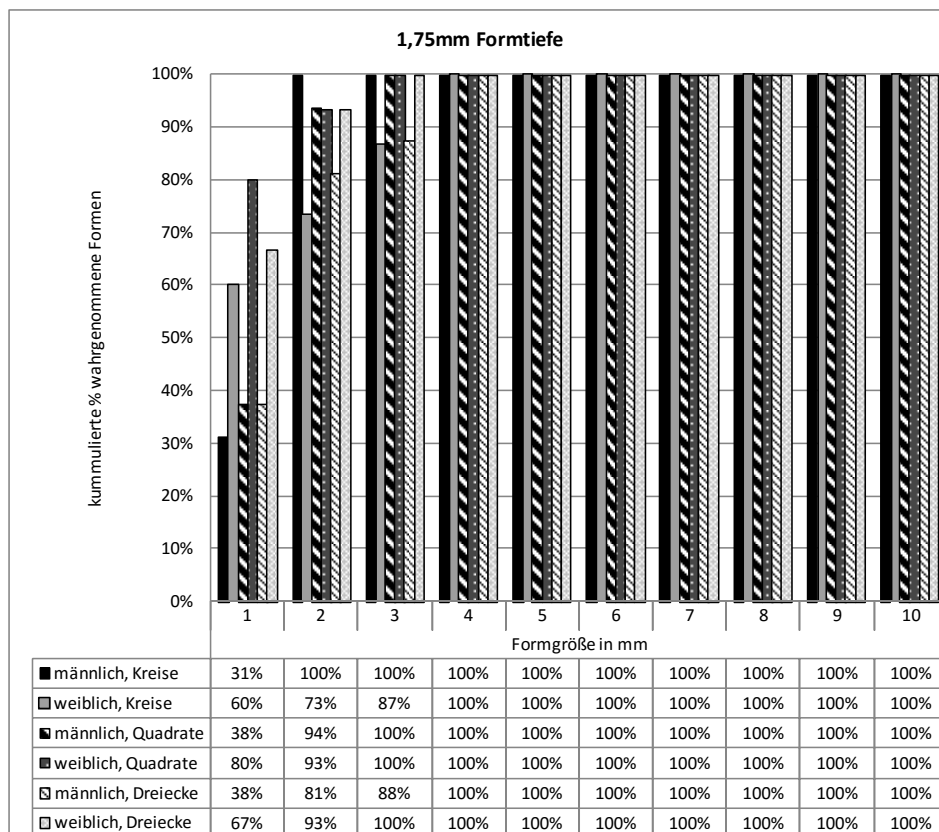
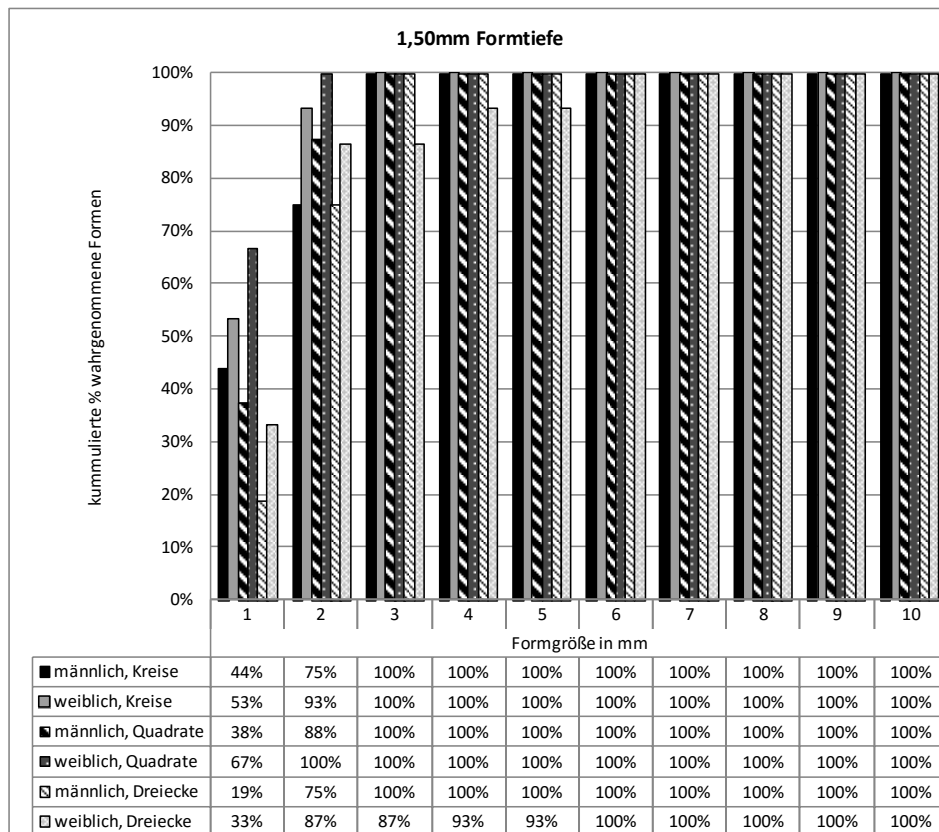


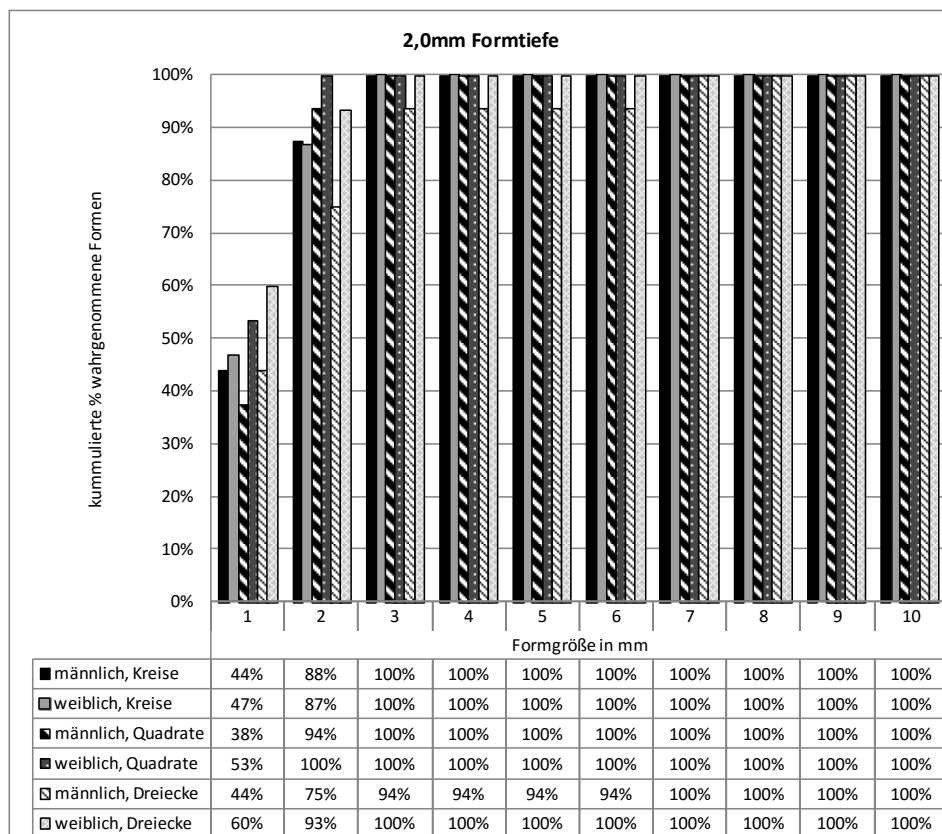




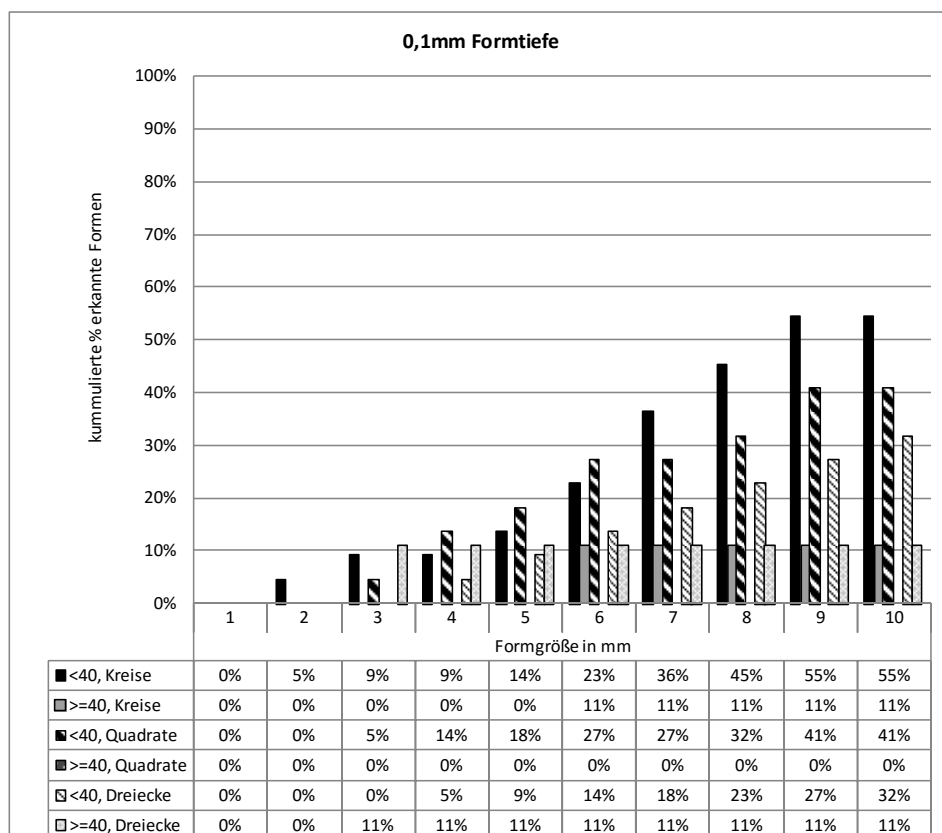


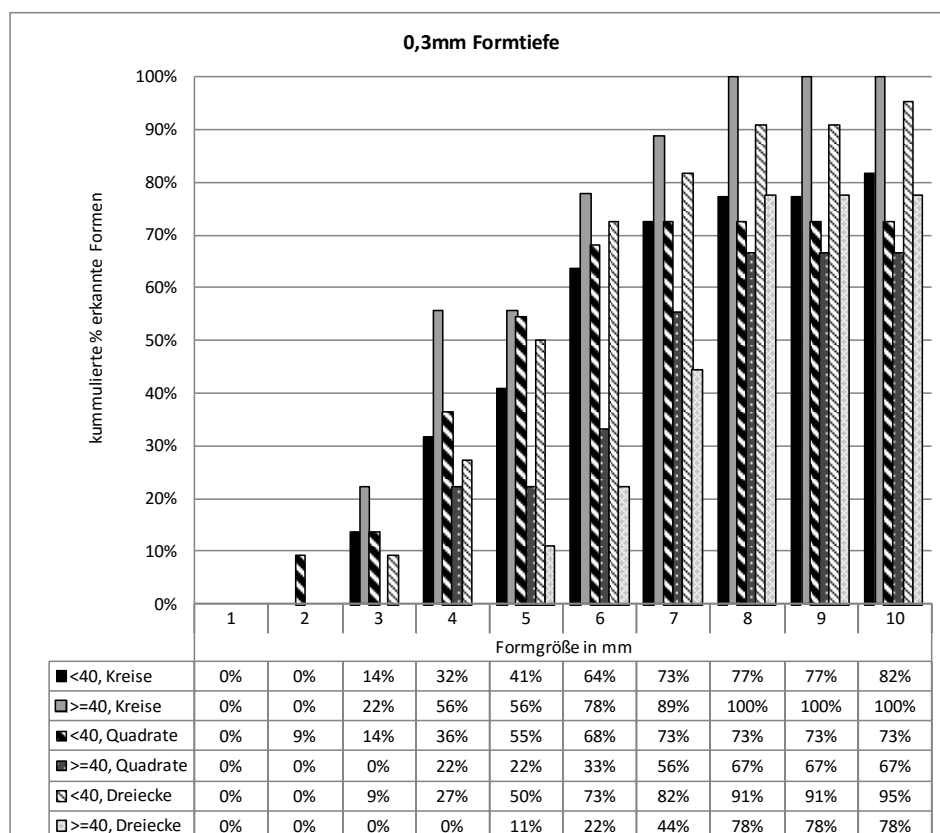
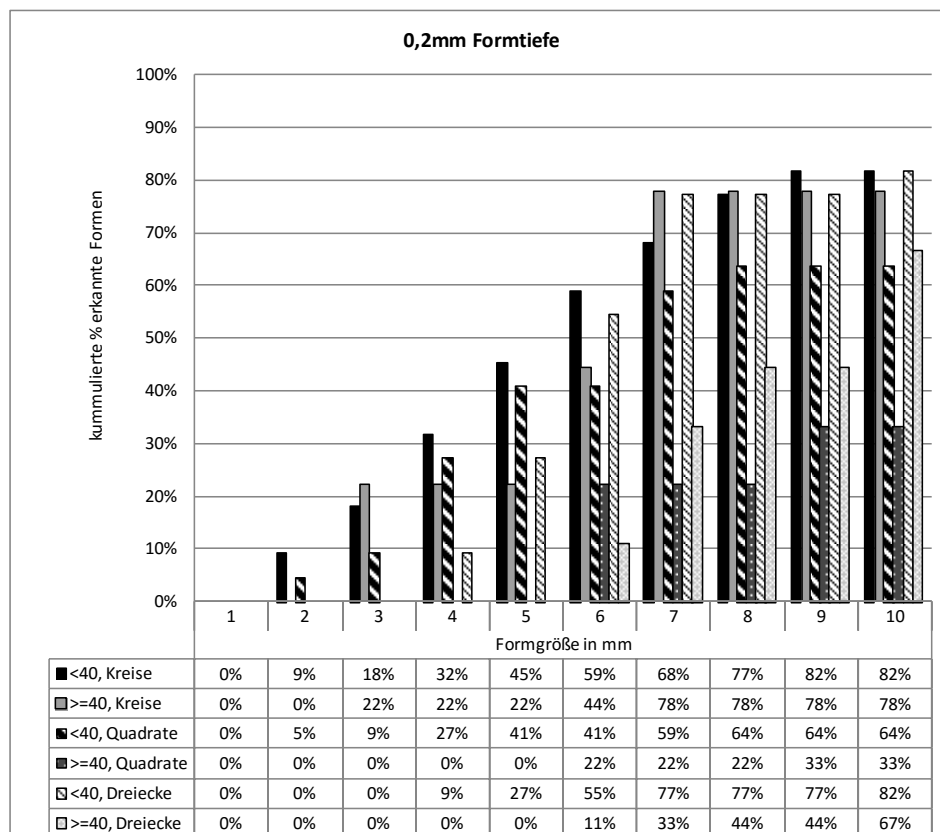


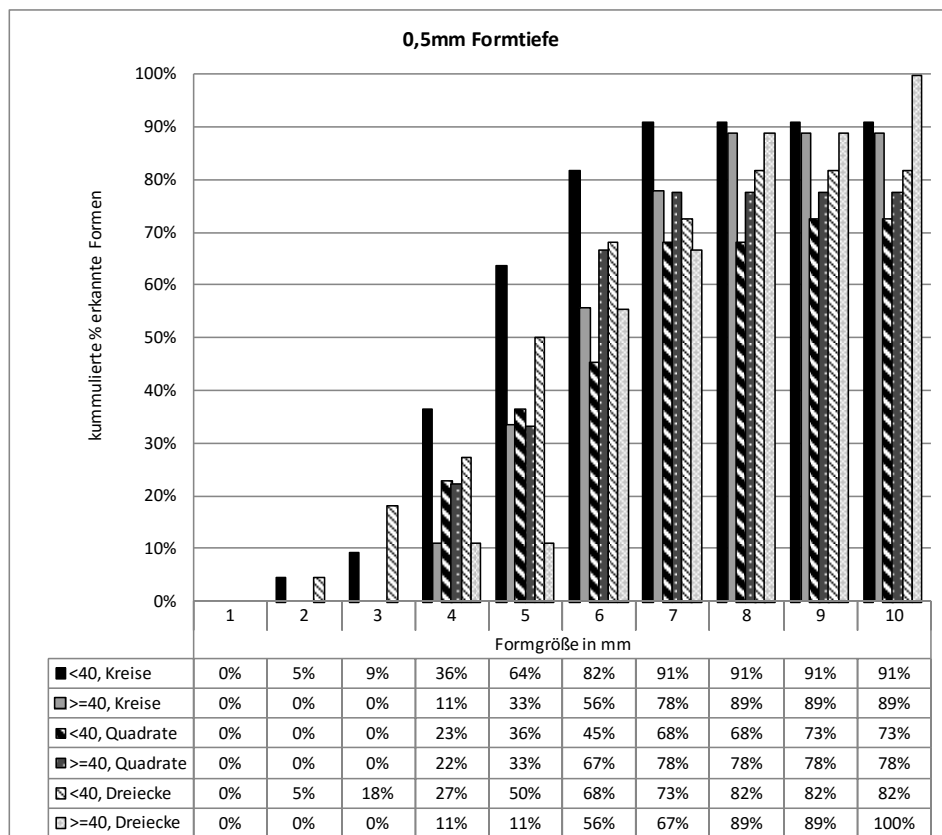
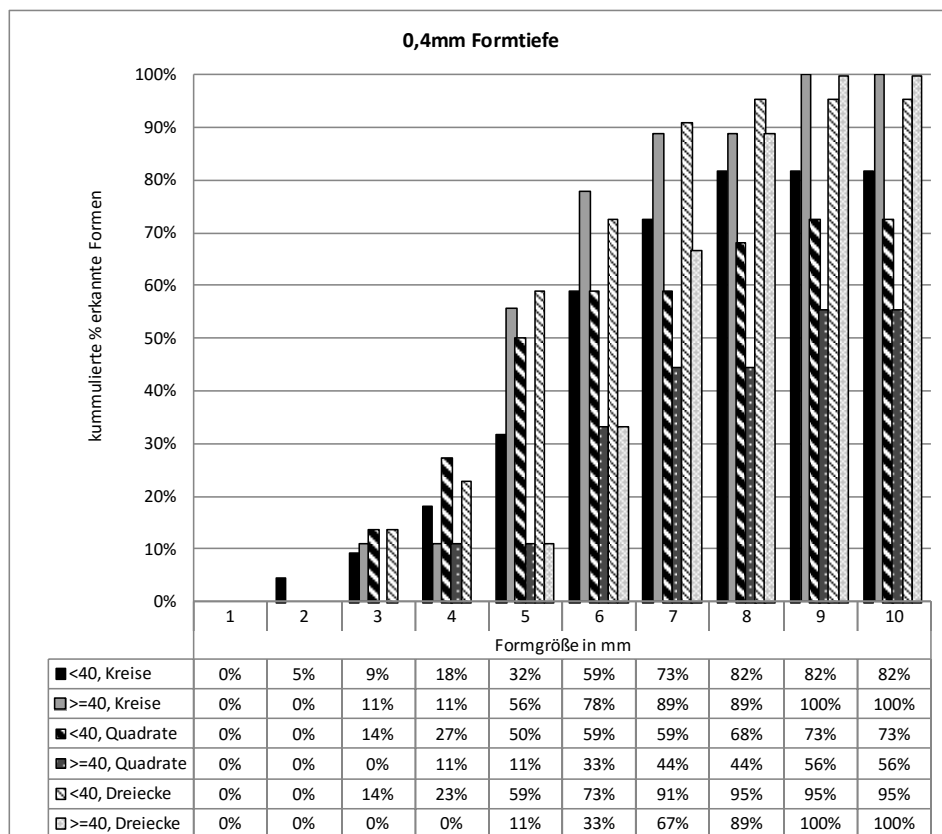




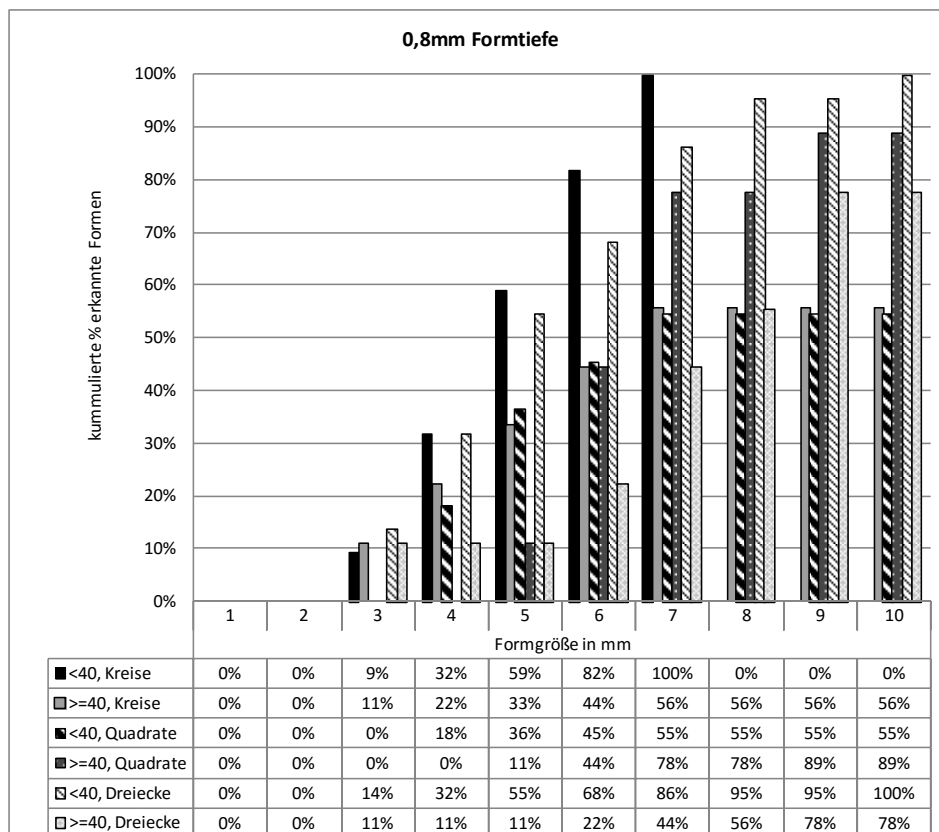
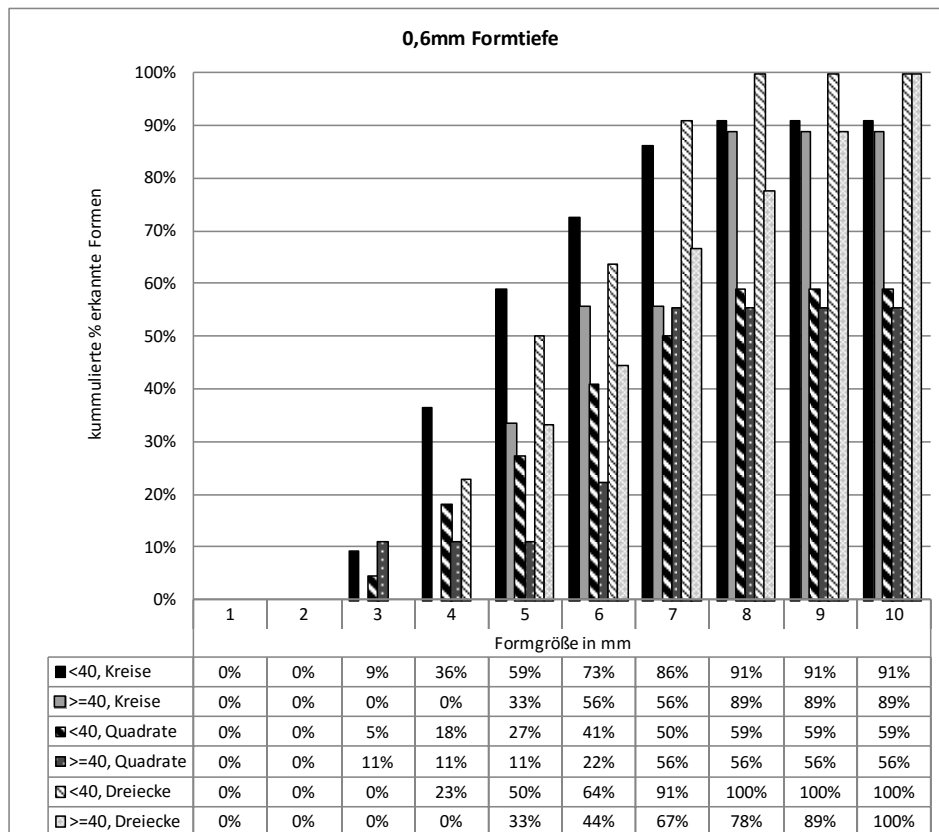
### A.1.3. Erkannte Formen nach Altersgruppen

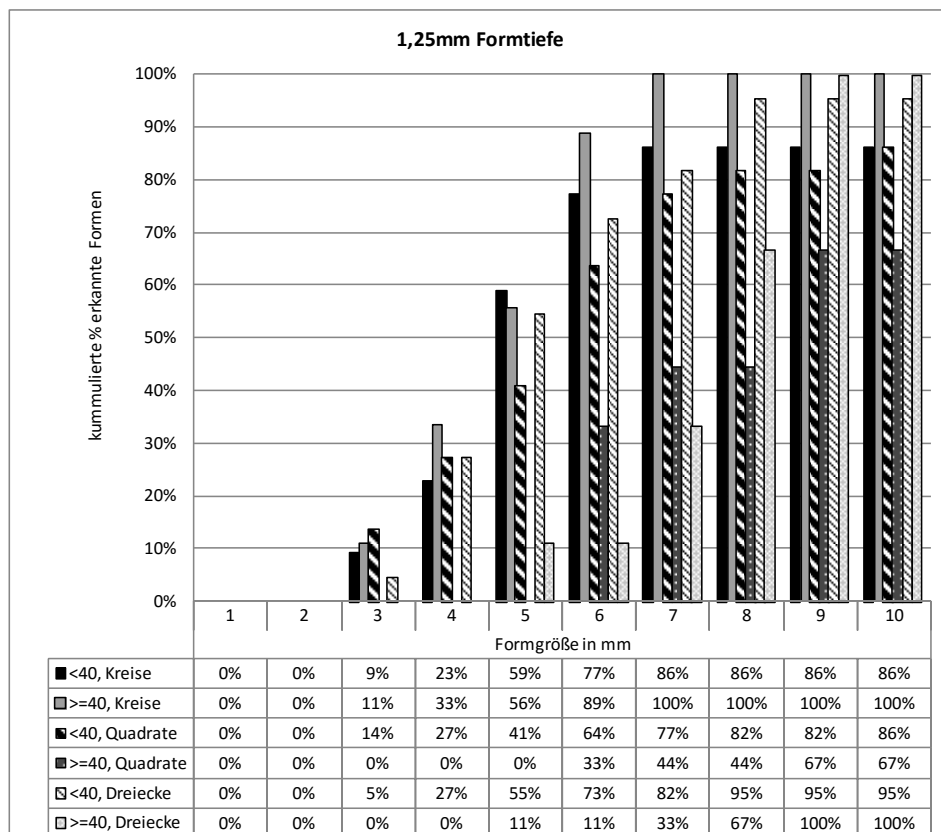
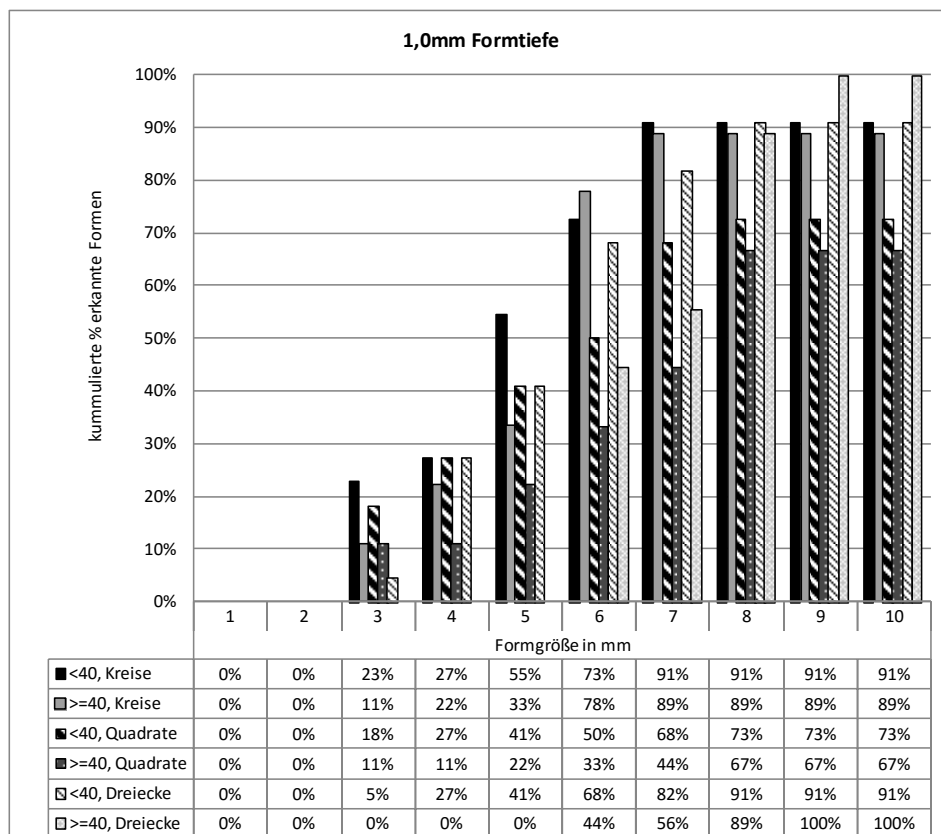


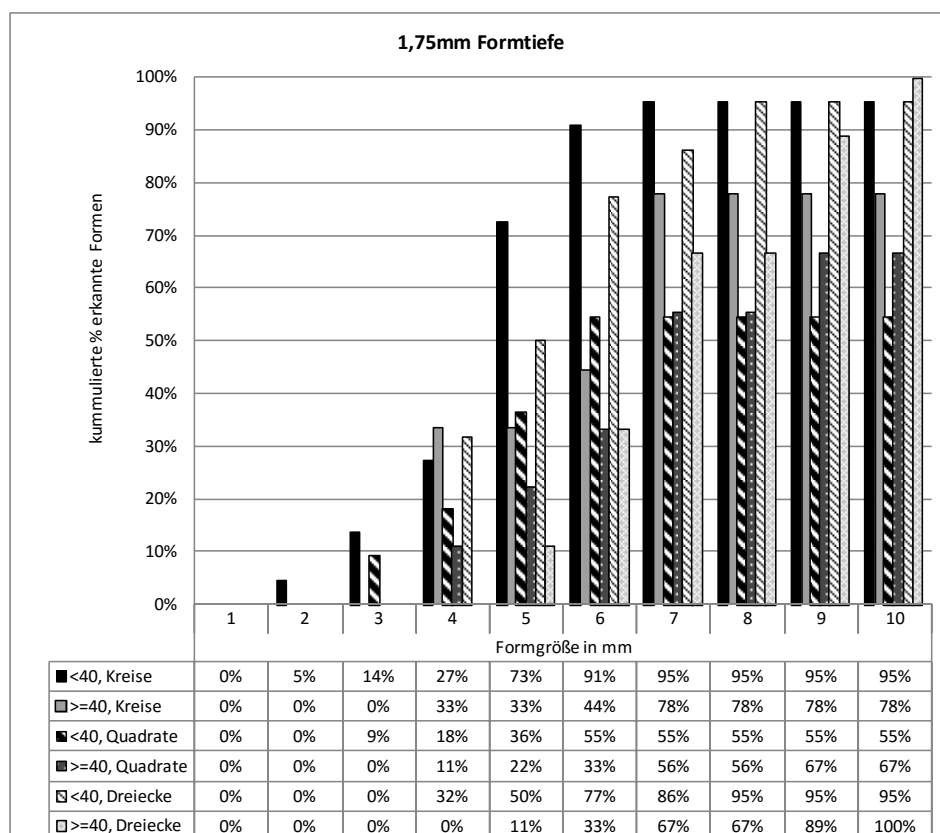
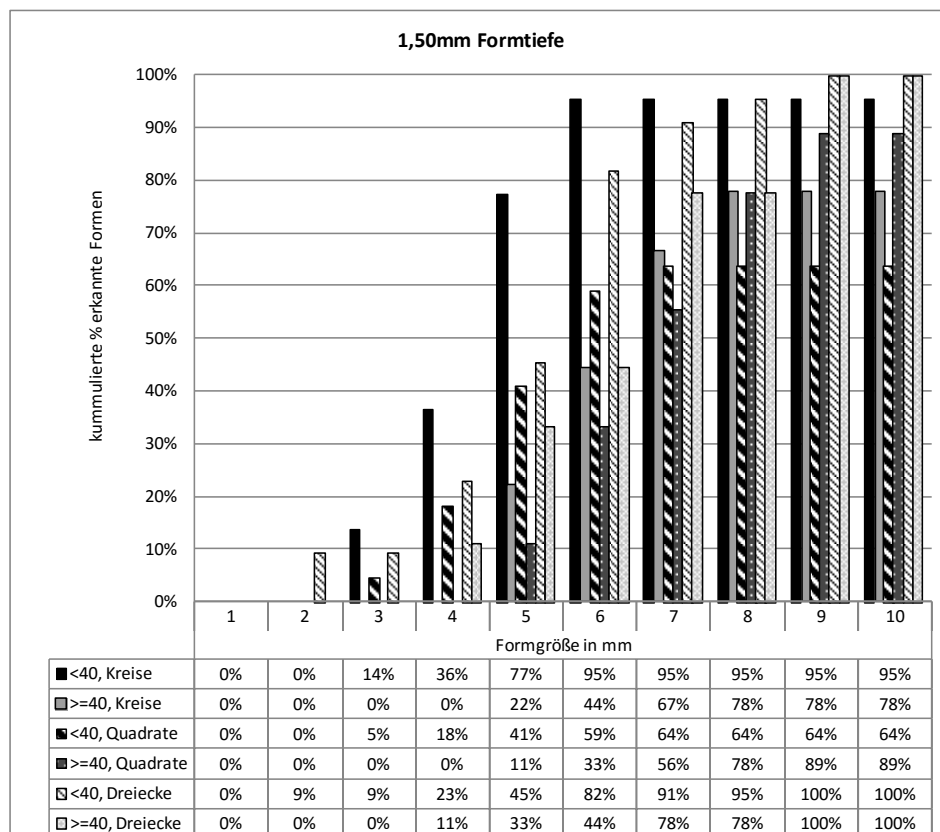


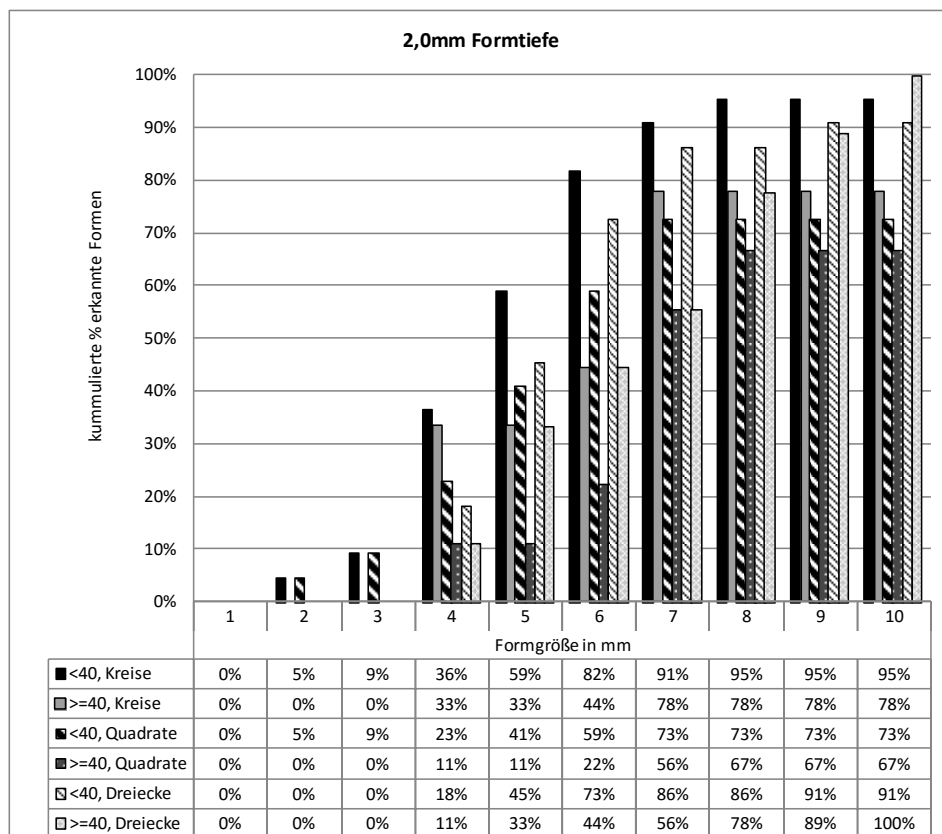




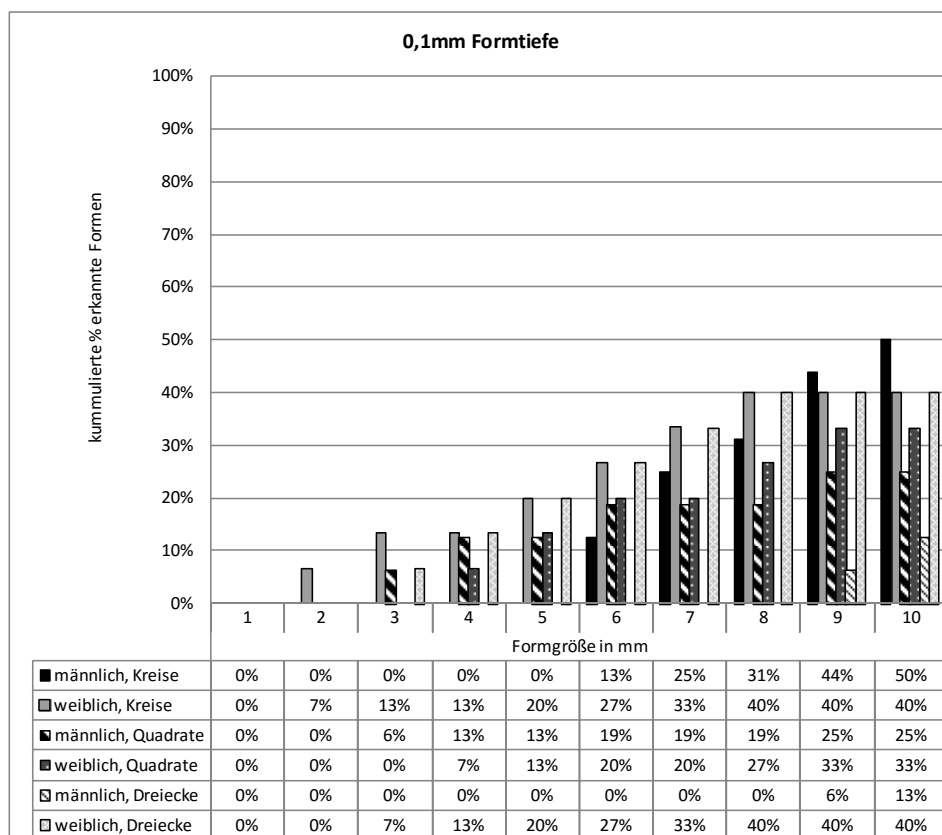


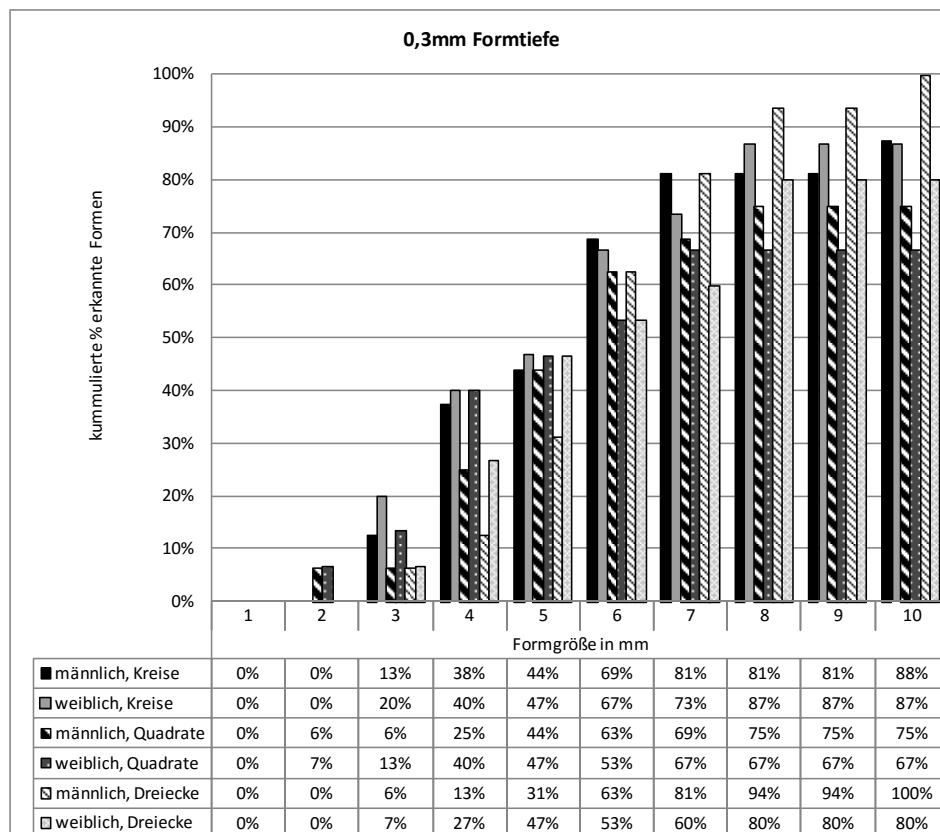
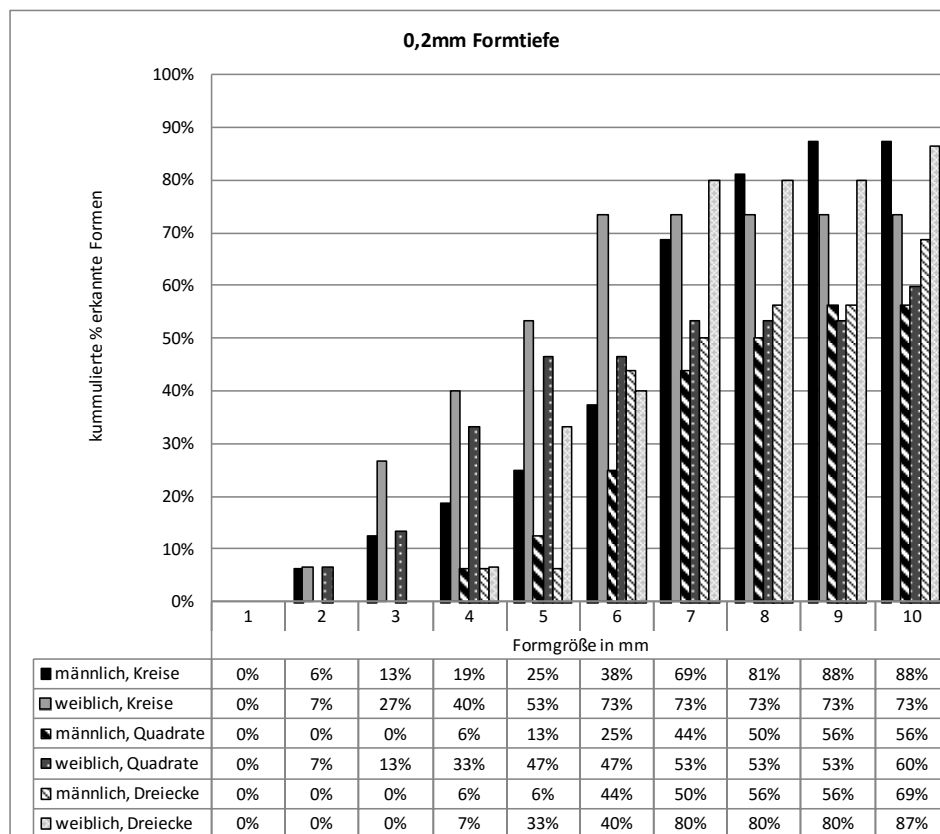


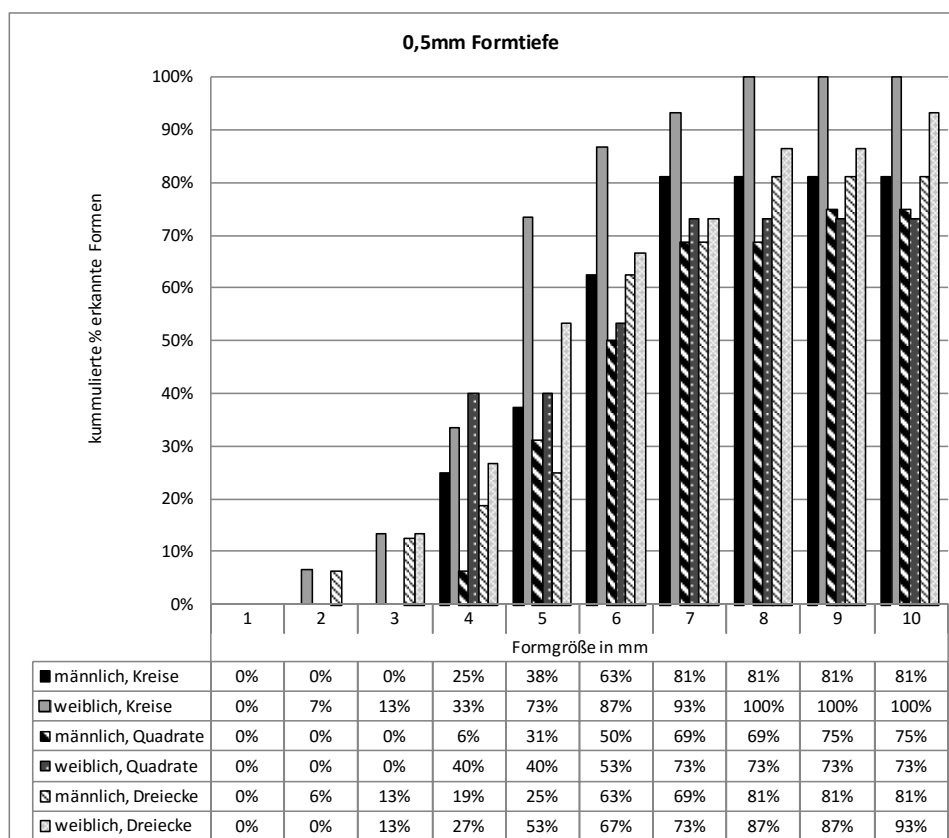
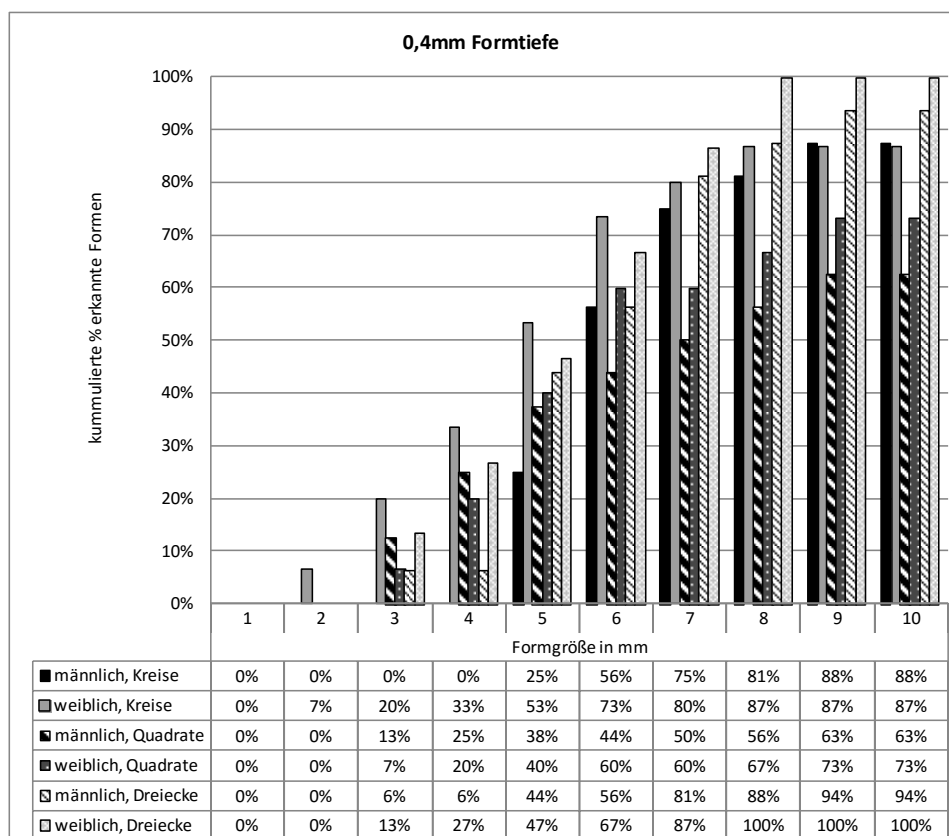


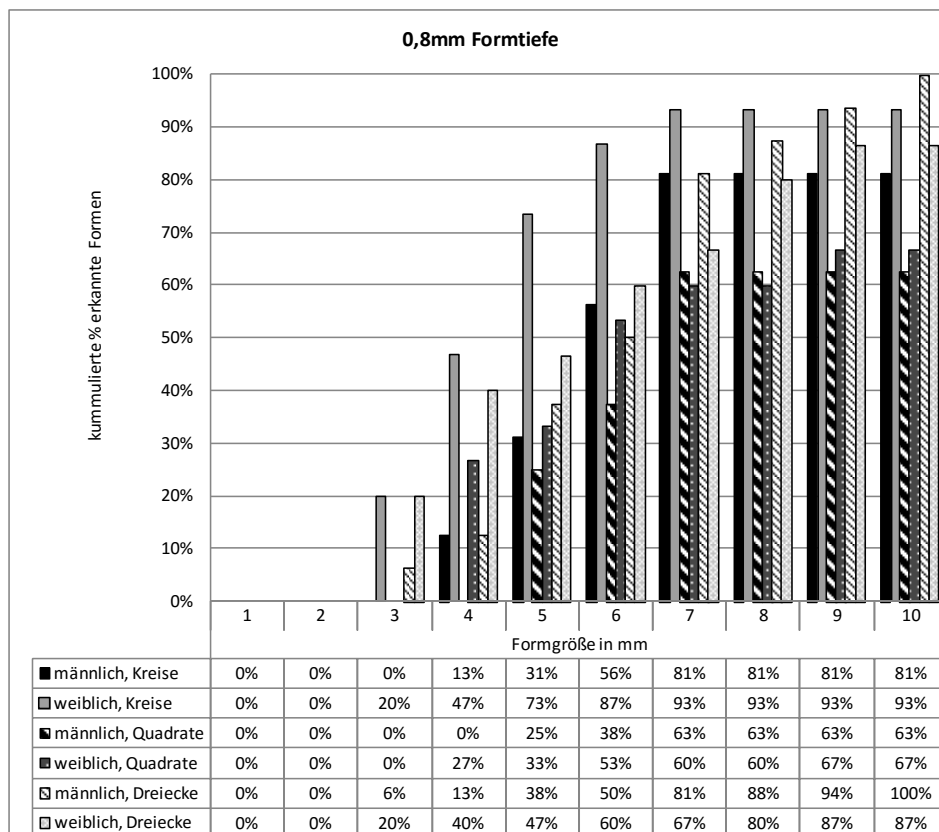
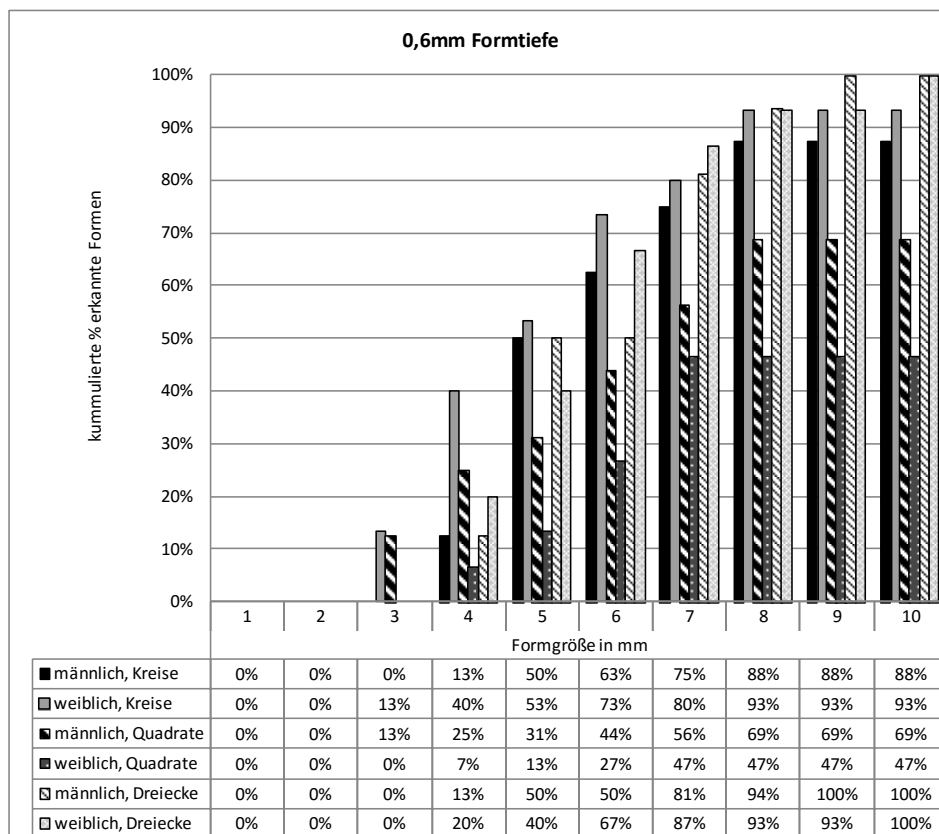


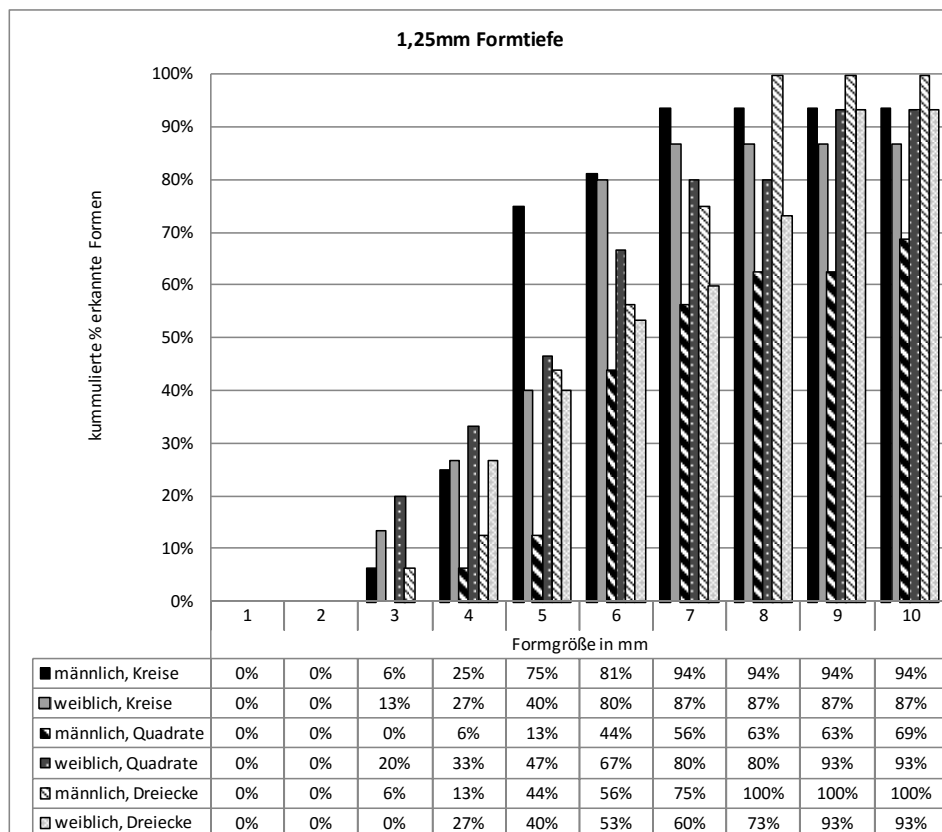
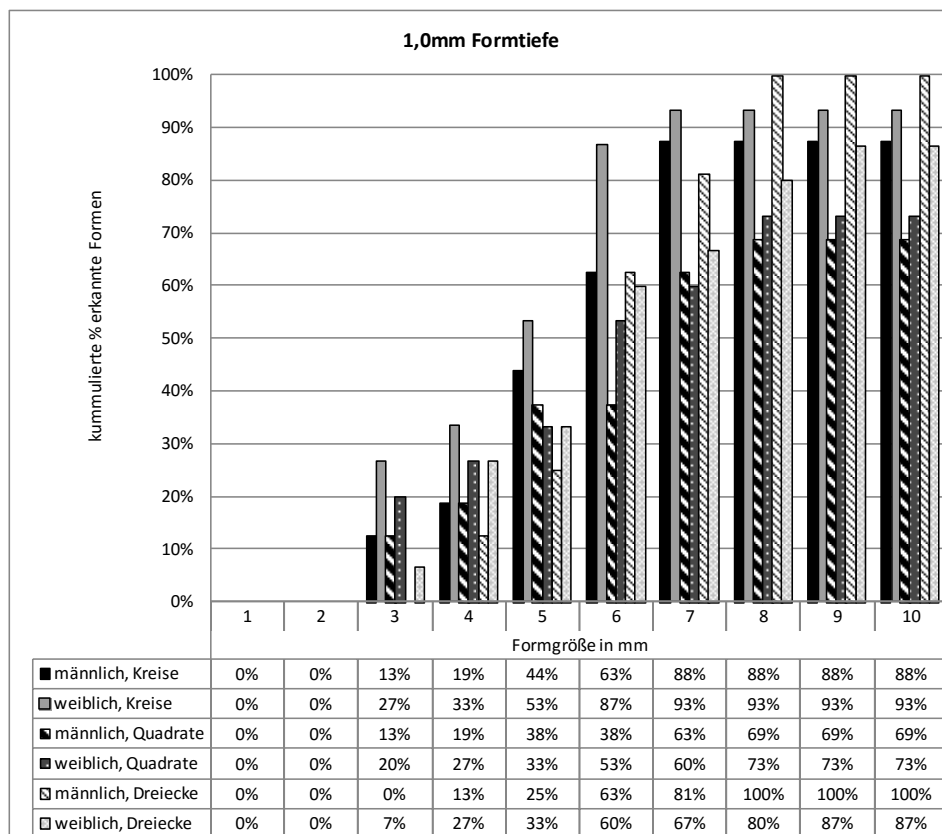
#### A.1.4. Erkannte Formen nach Geschlecht



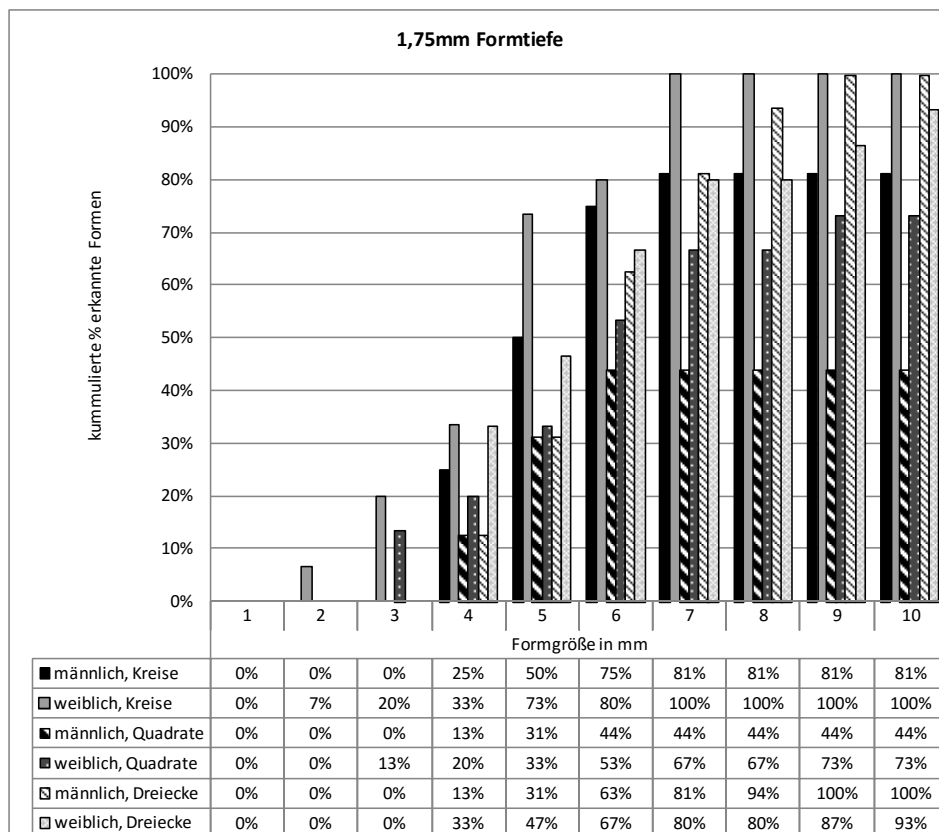
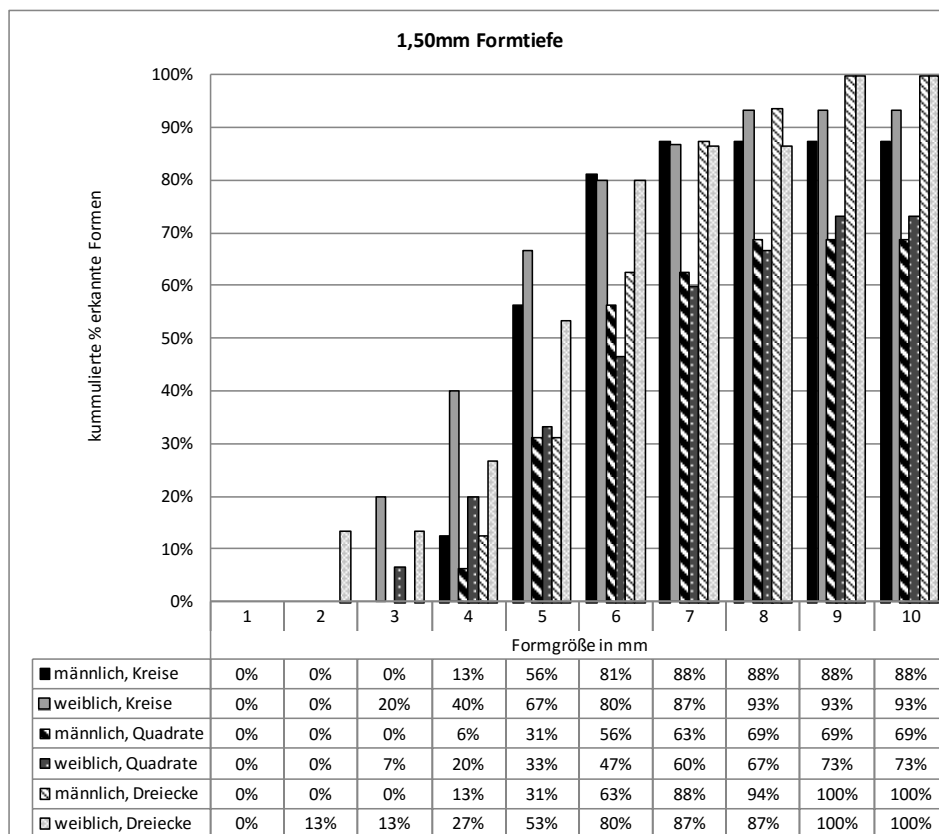


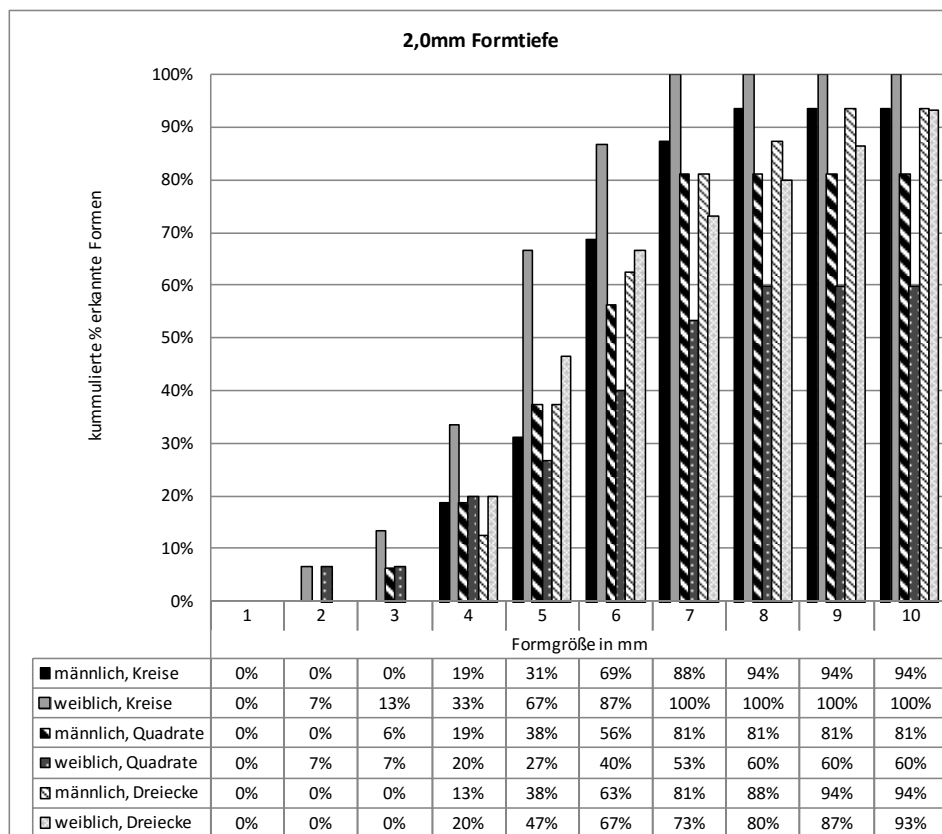






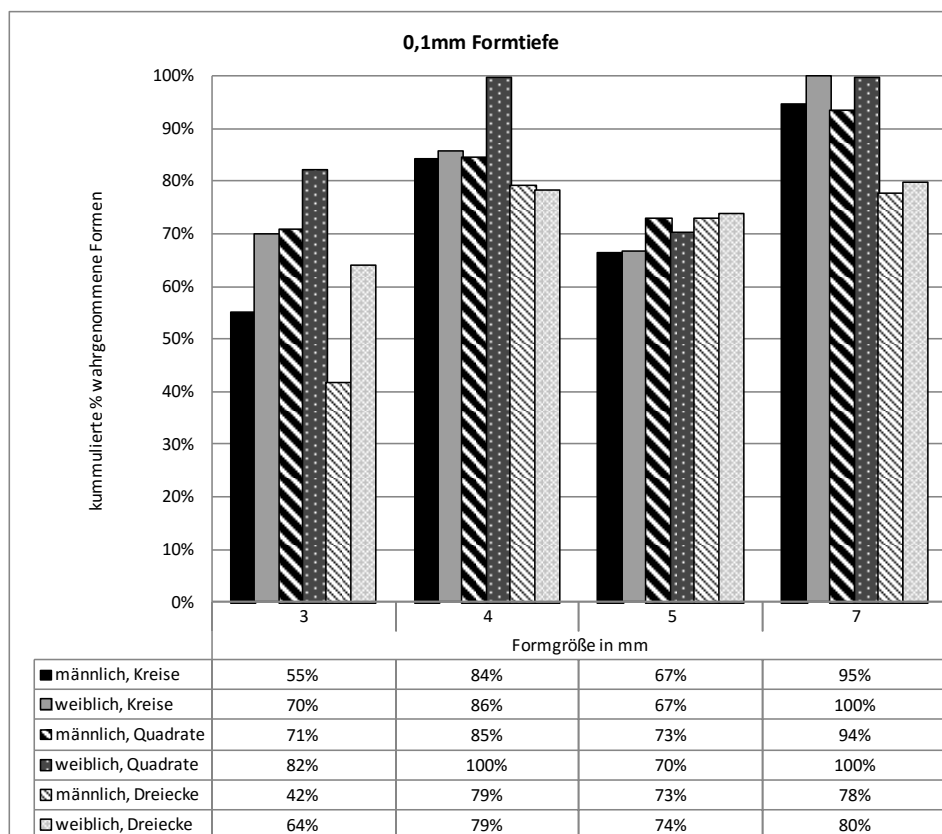


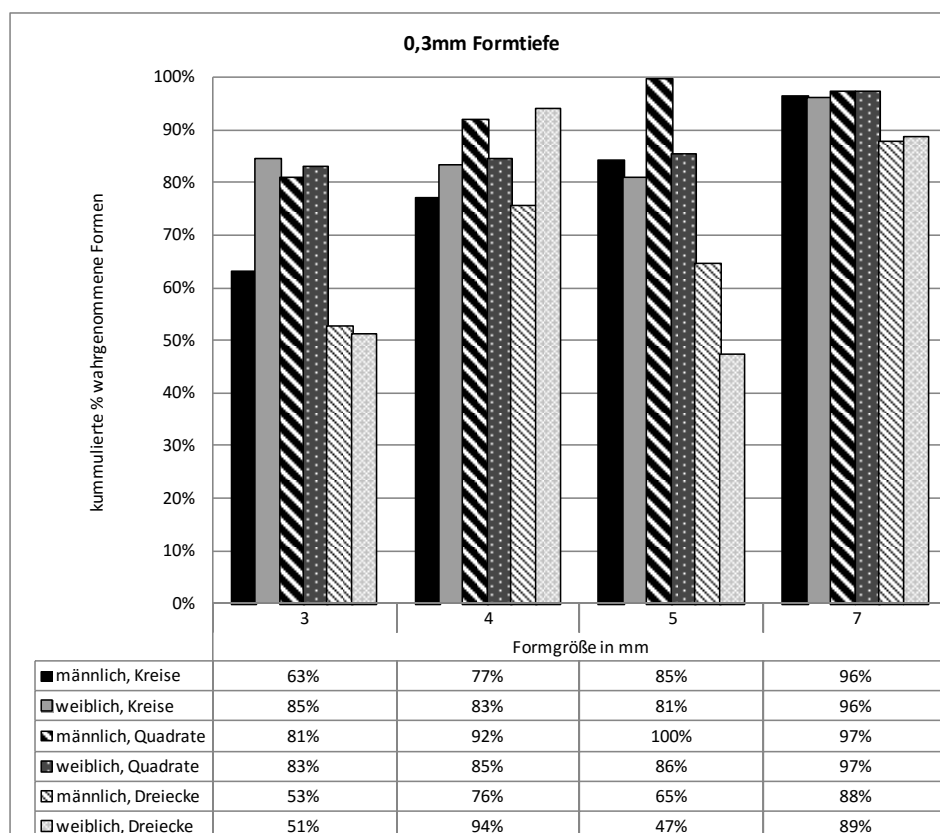
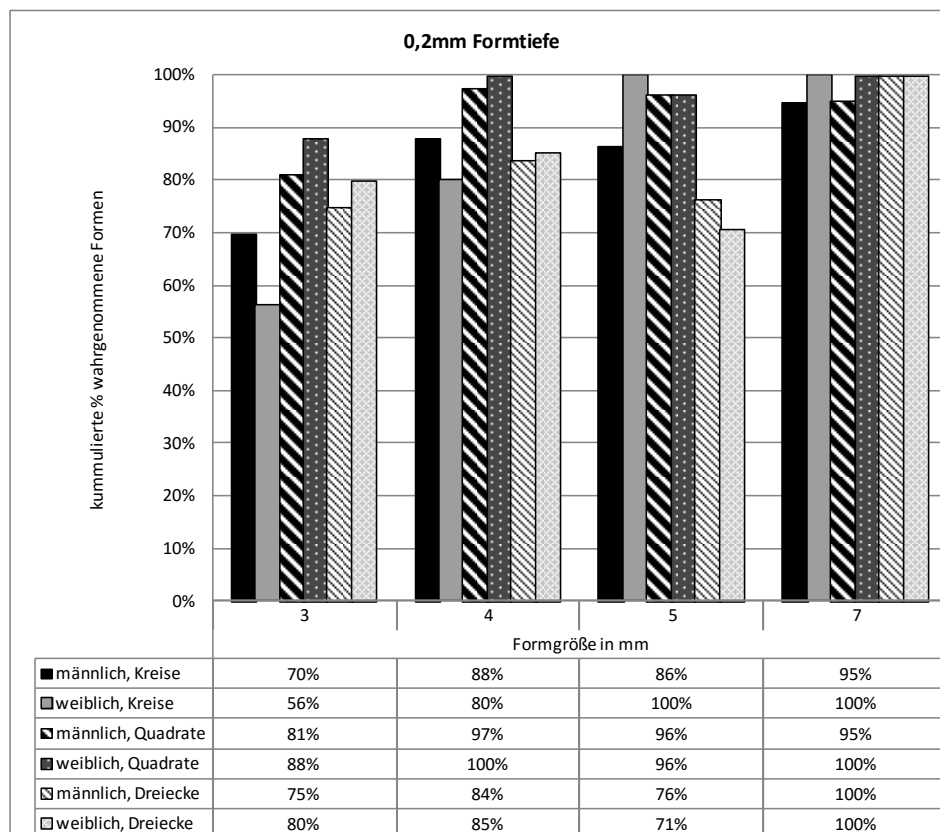


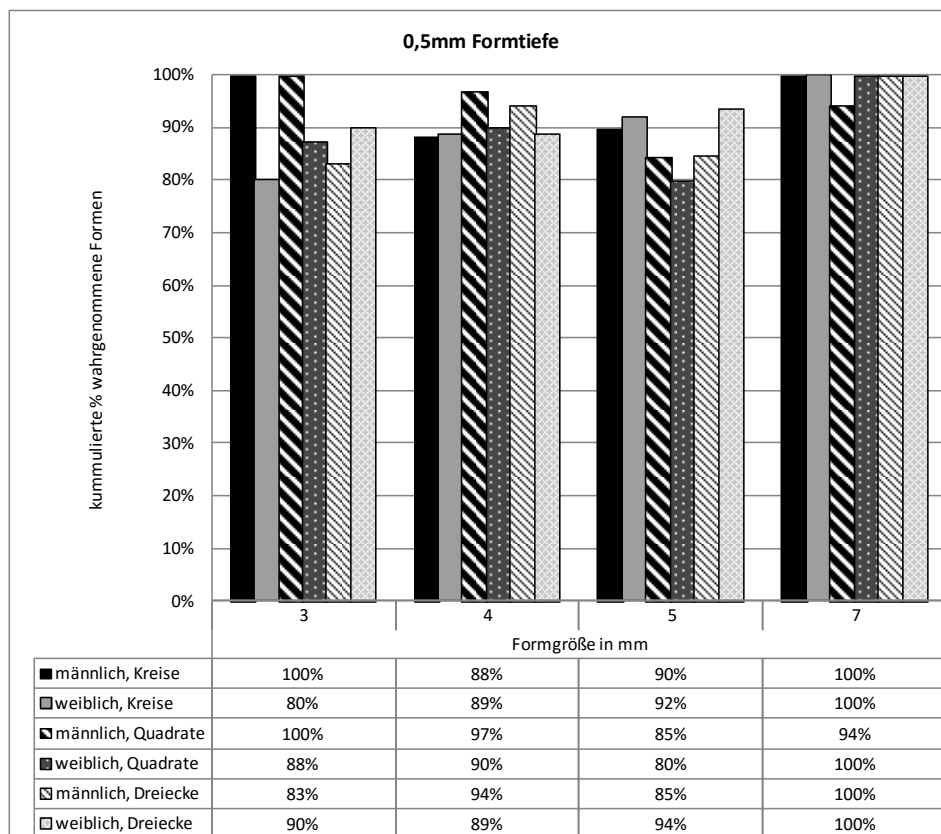


## A.2. Diagramme zu Studie 2

### A.2.1. Wahrgenommene Formen nach Geschlecht

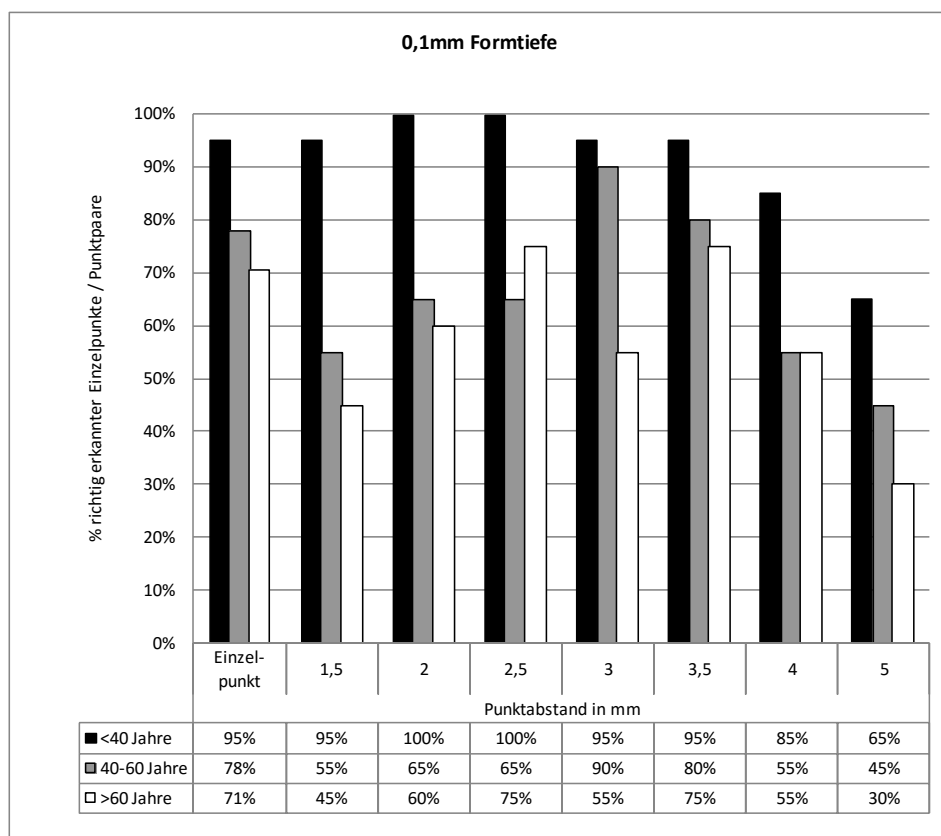


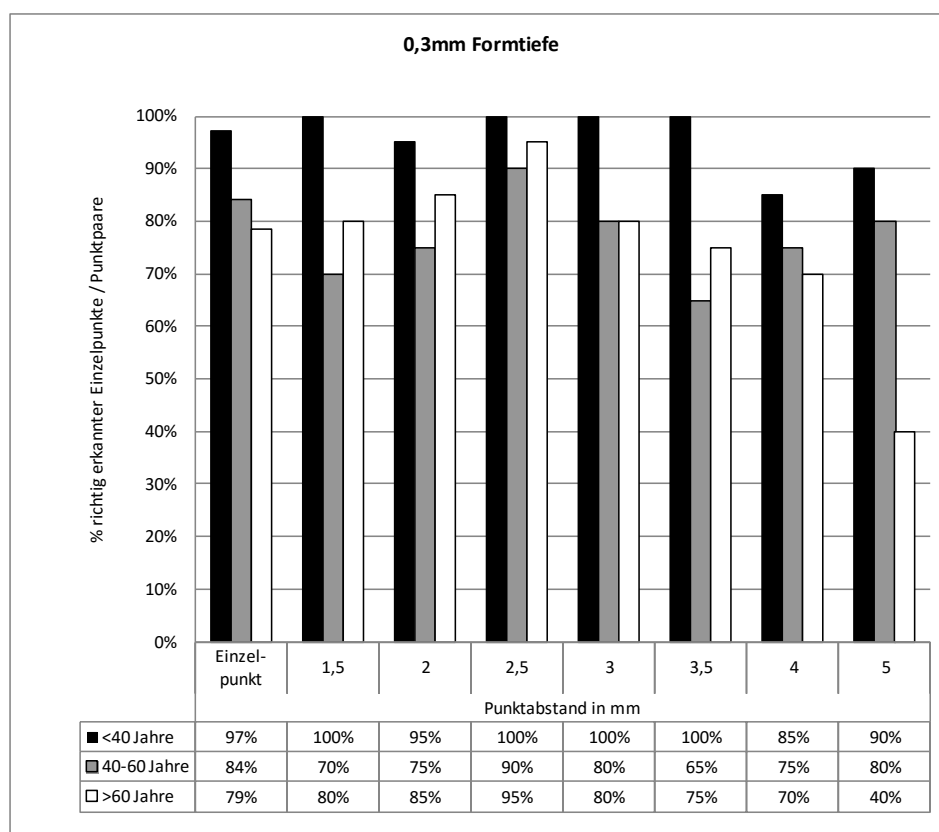
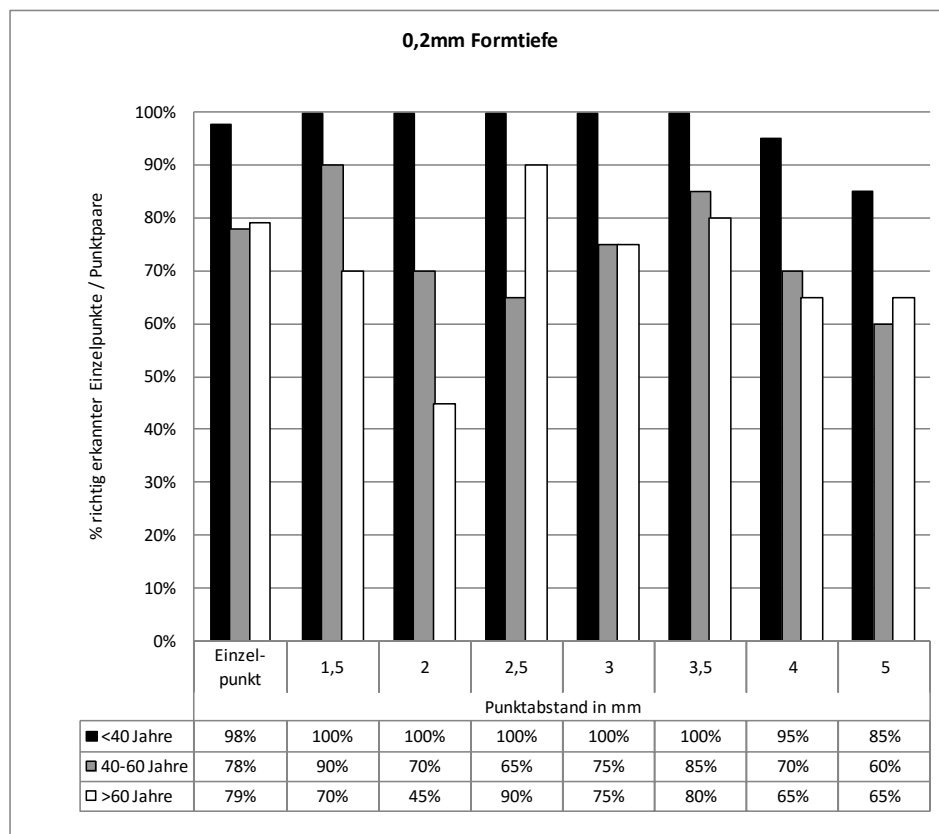


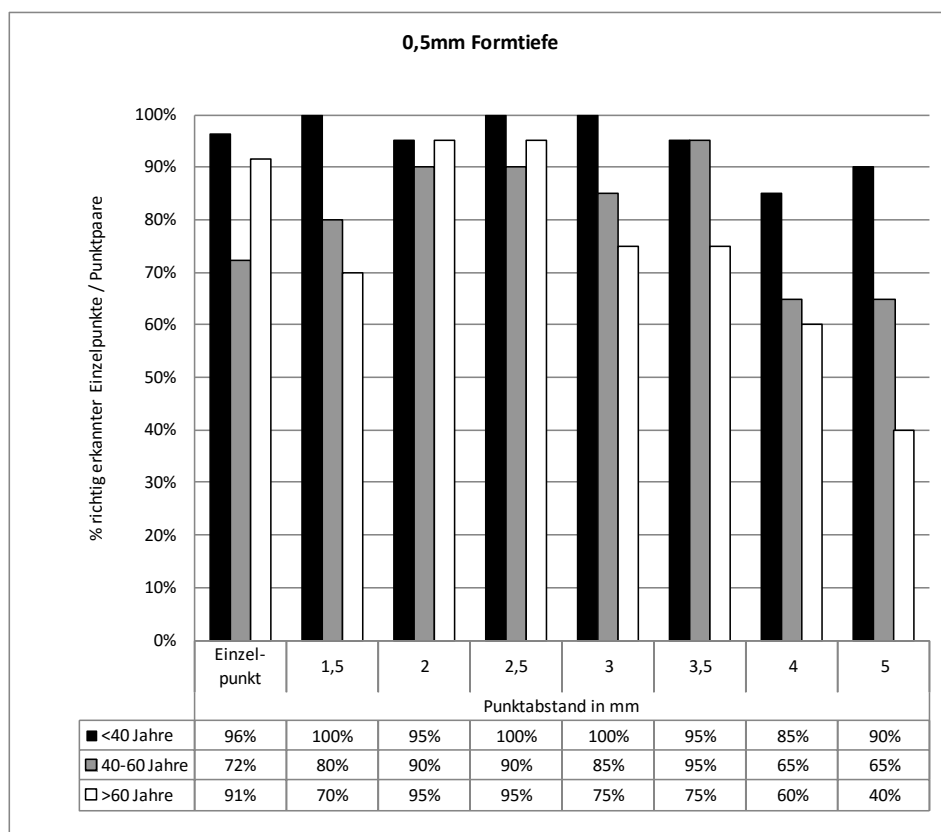


### A.3. Diagramme zu Studie 3

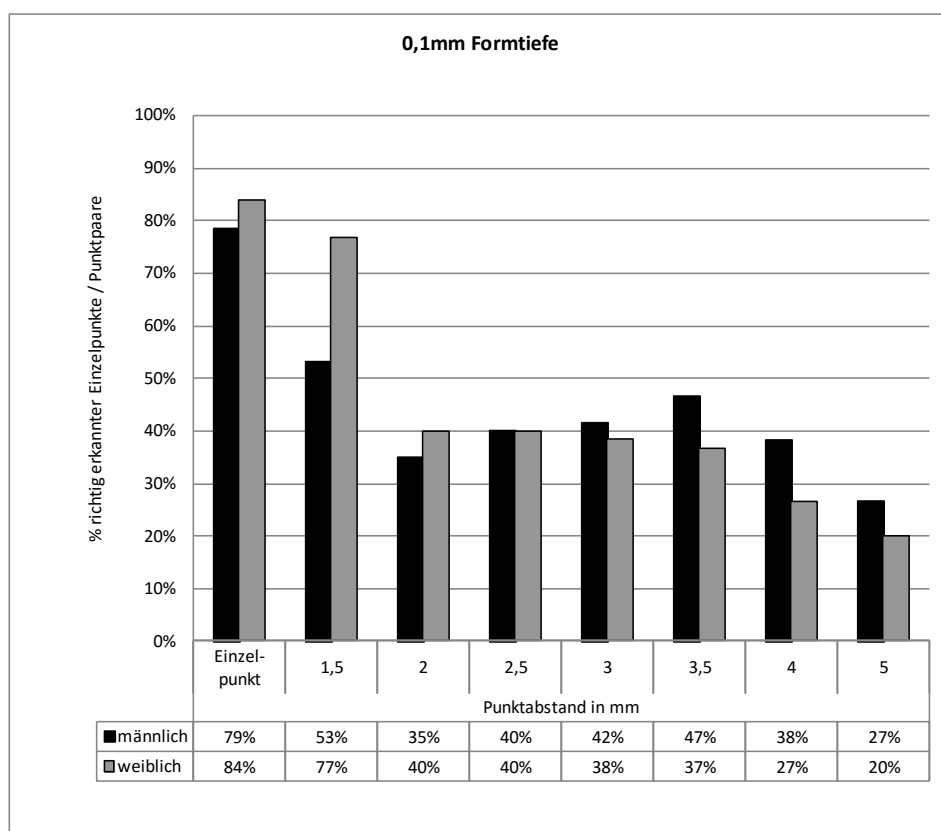
#### A.3.1. Richtig erkannte Einzelpunkte und Punktpaare nach Alter

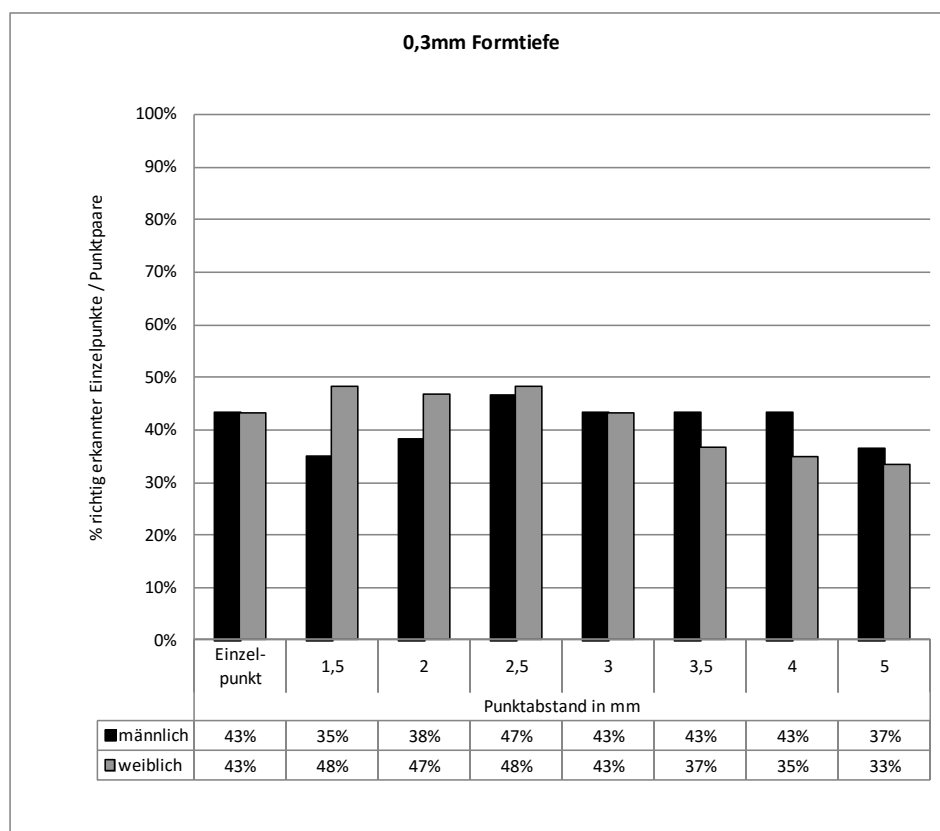
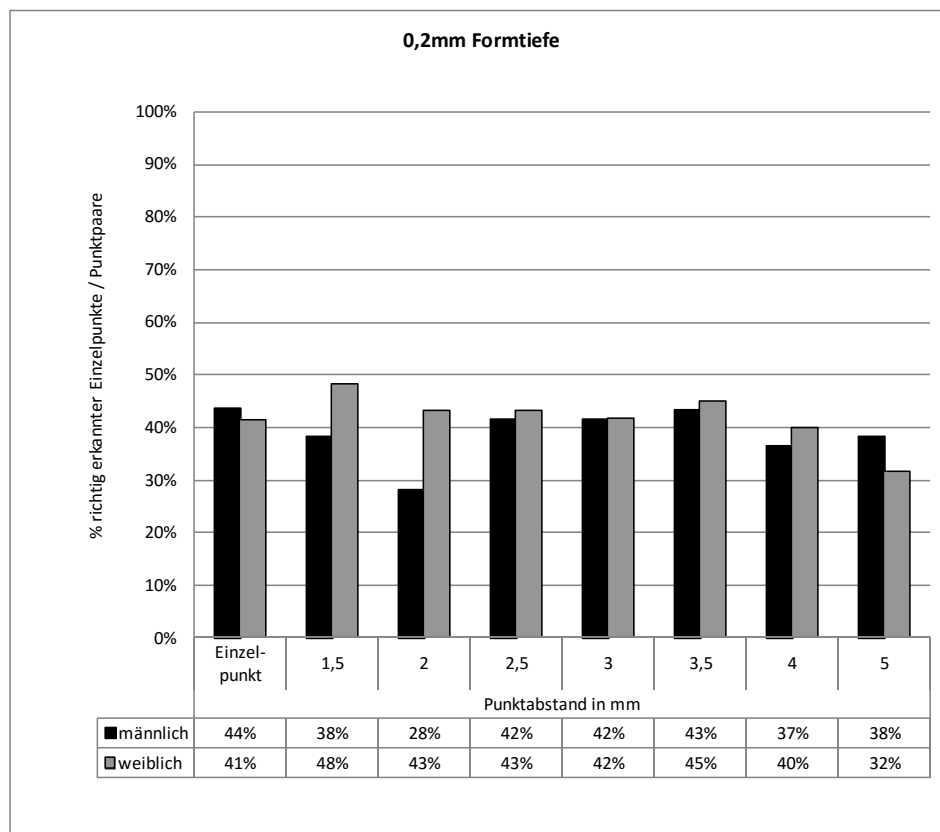


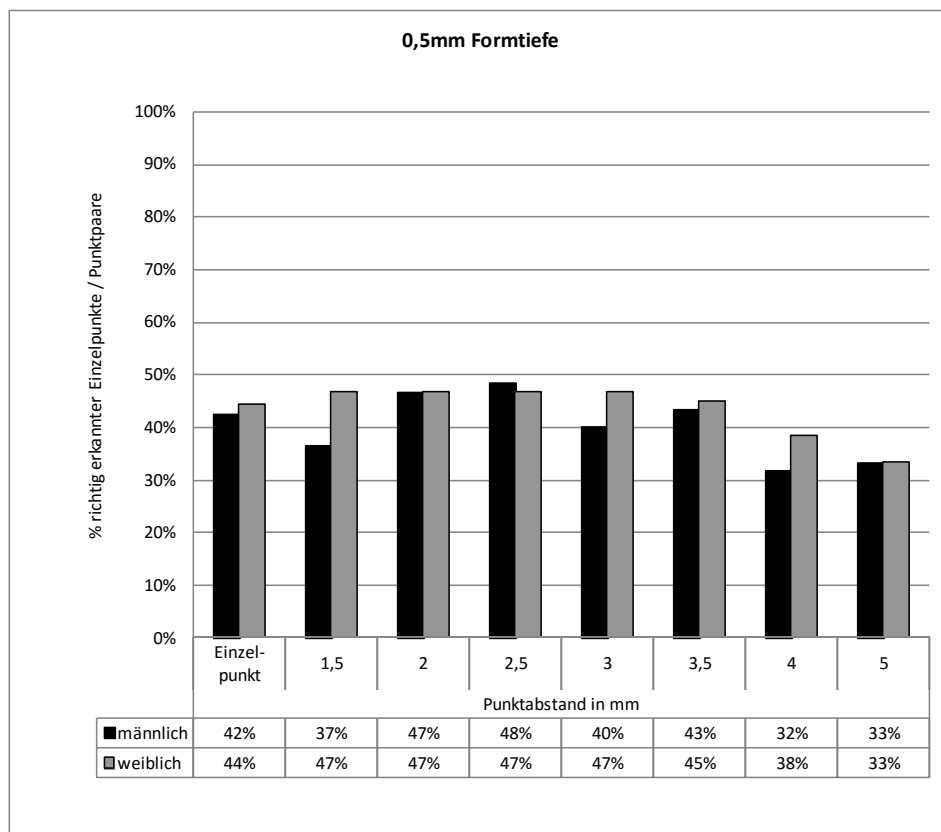




### A.3.2. Richtig erkannte Einzelpunkte und Punktpaare nach Geschlecht

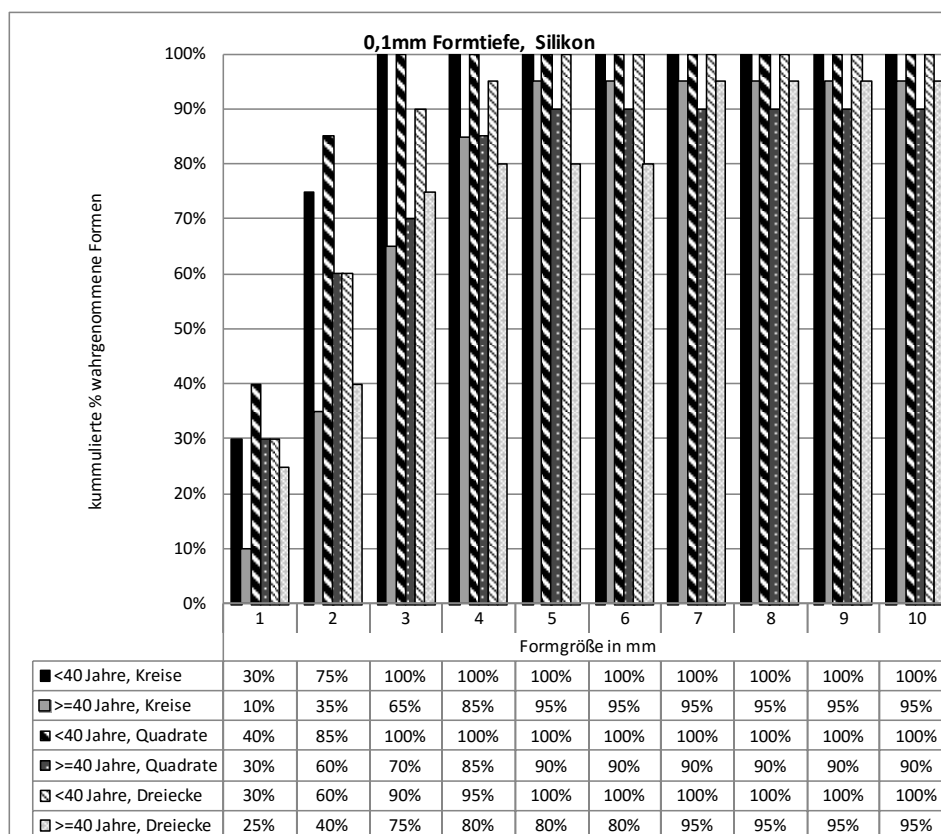




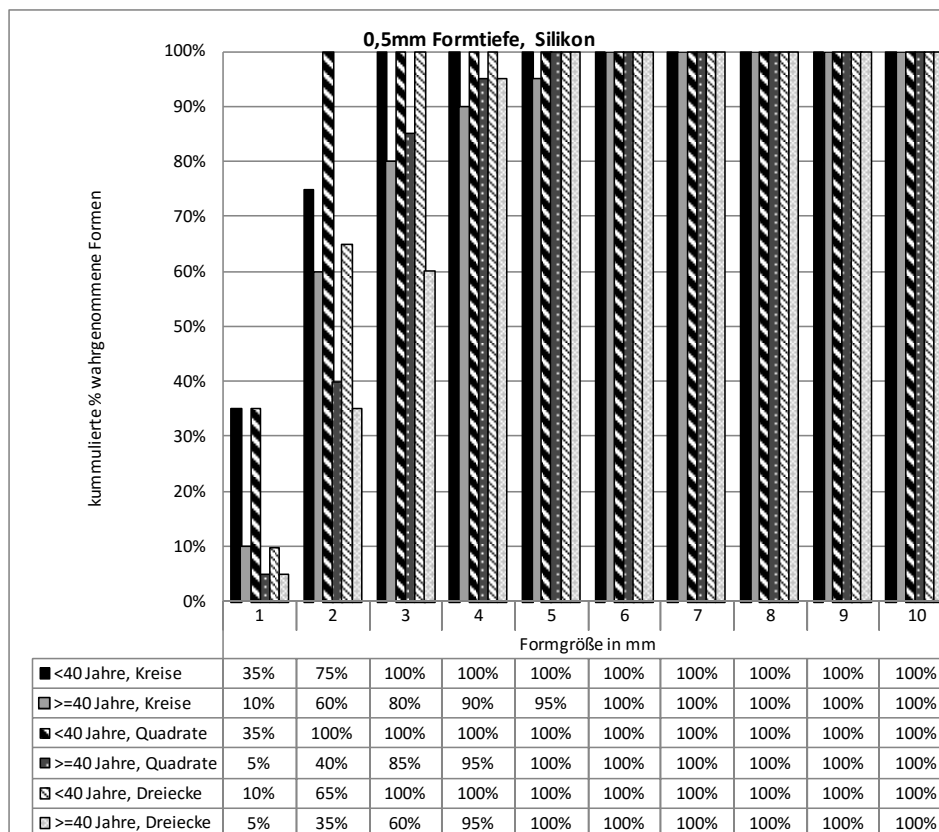
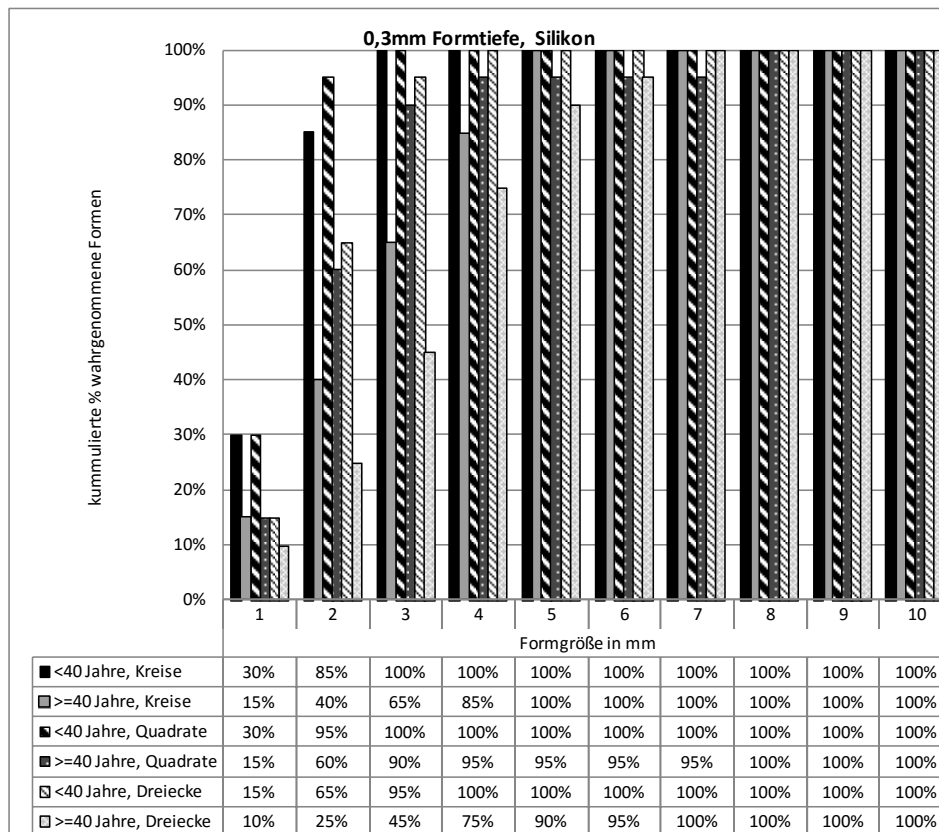


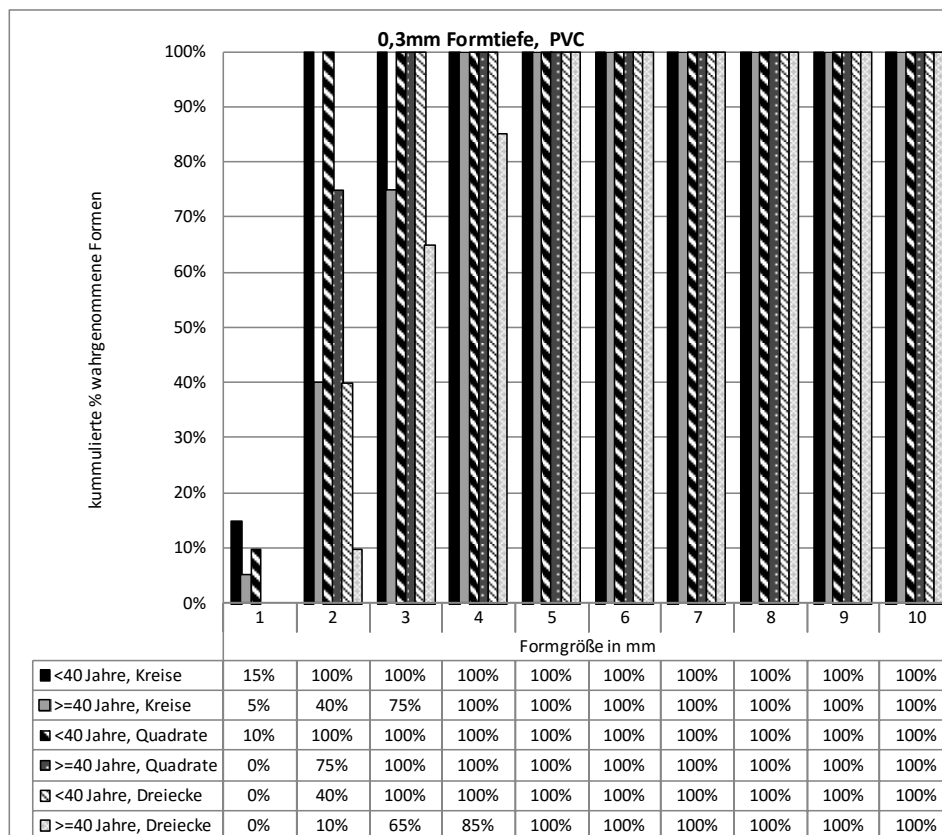
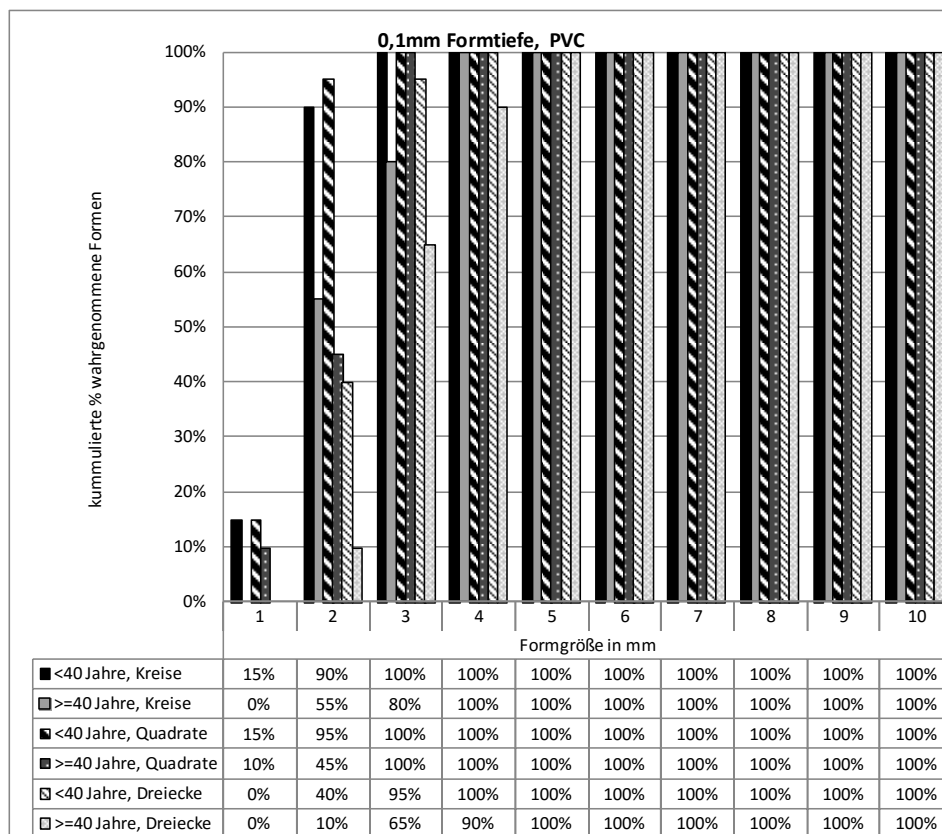
## A.4. Diagramme zu Studie 4

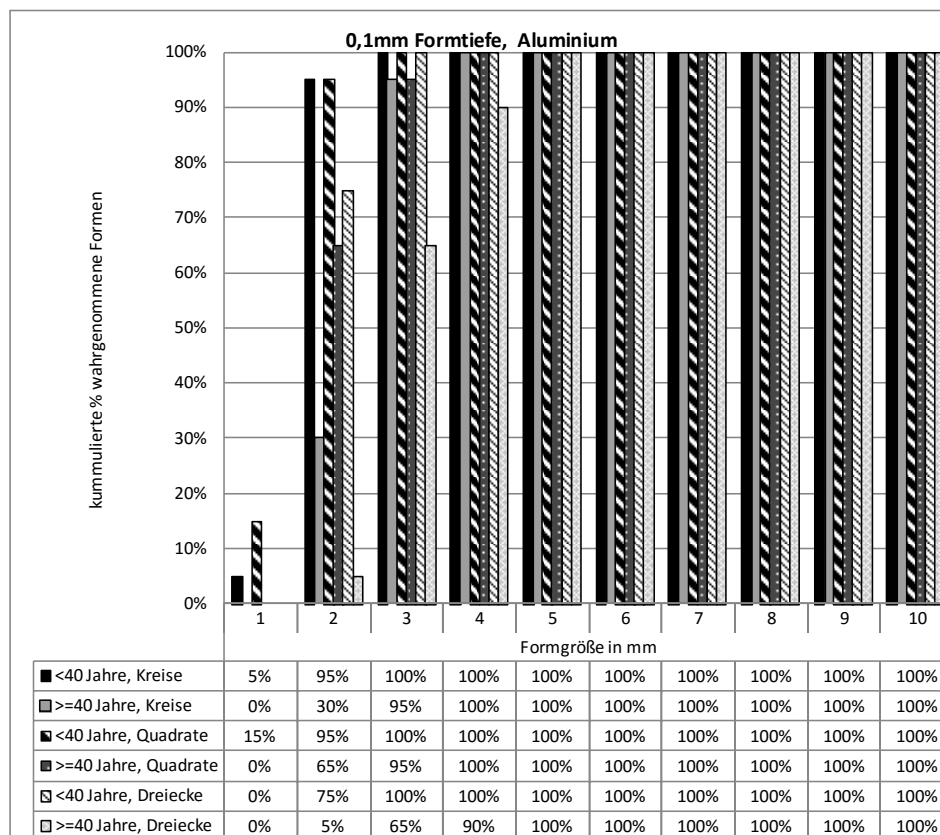
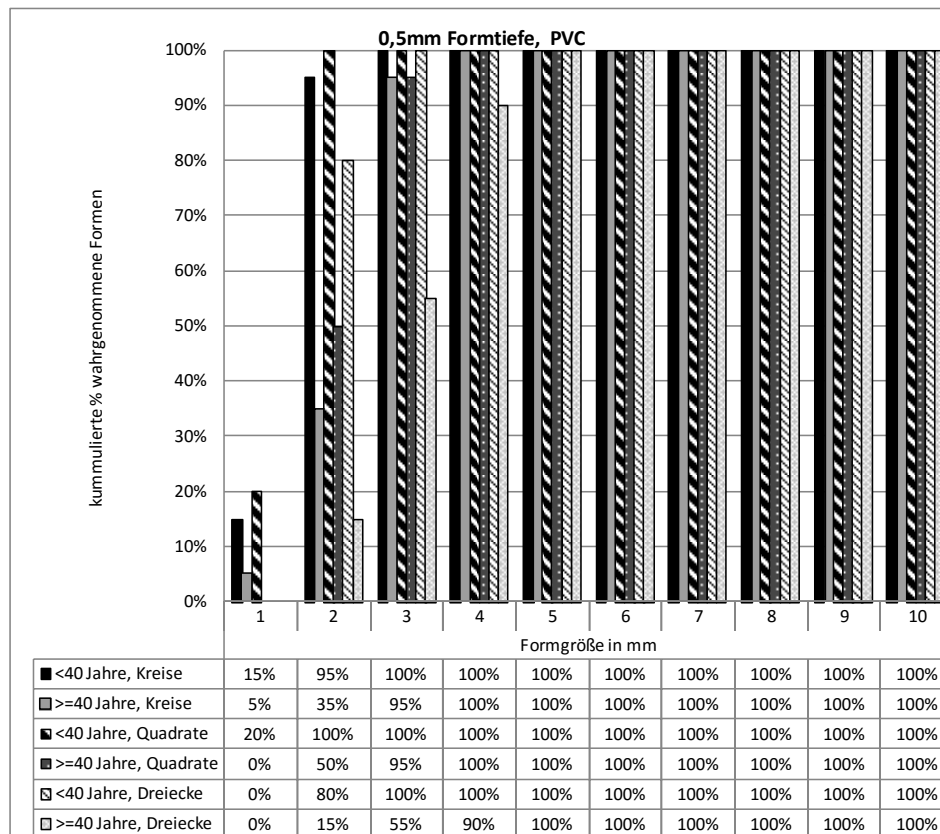
### A.4.1. Wahrgenommene Formen nach Altersgruppen

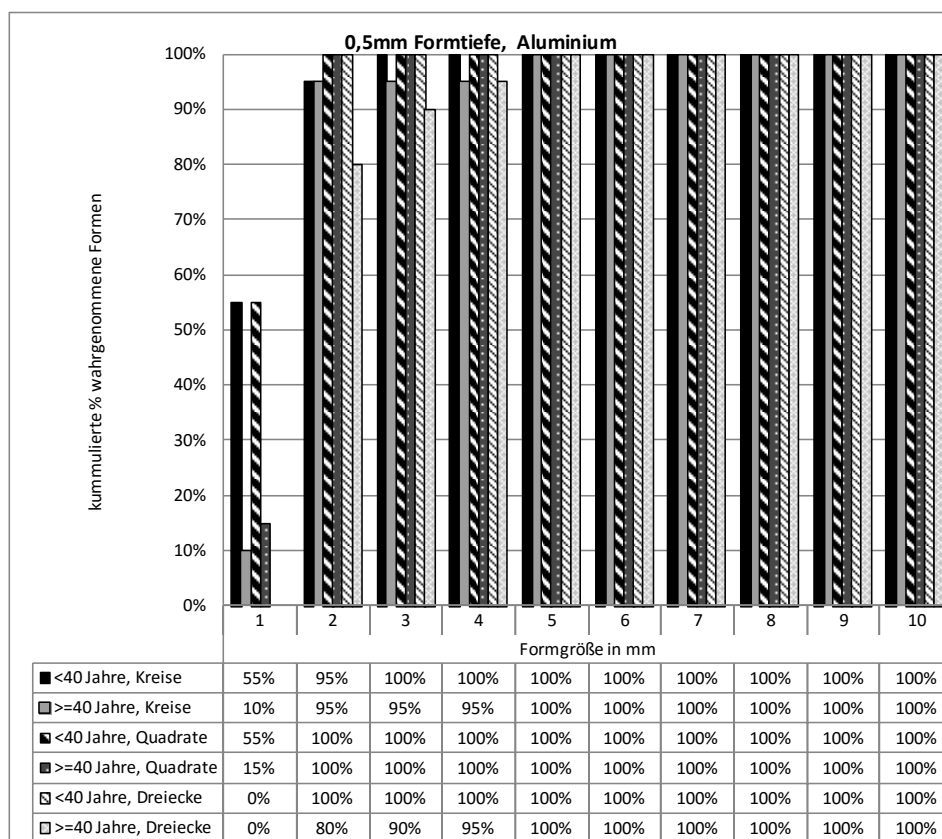
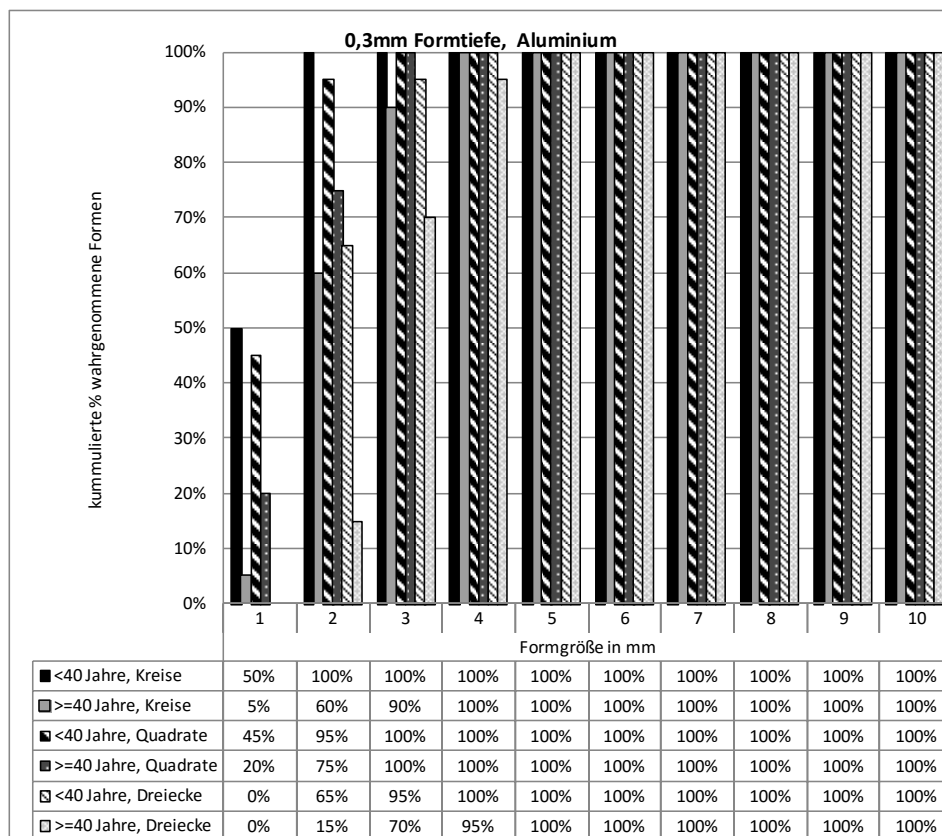




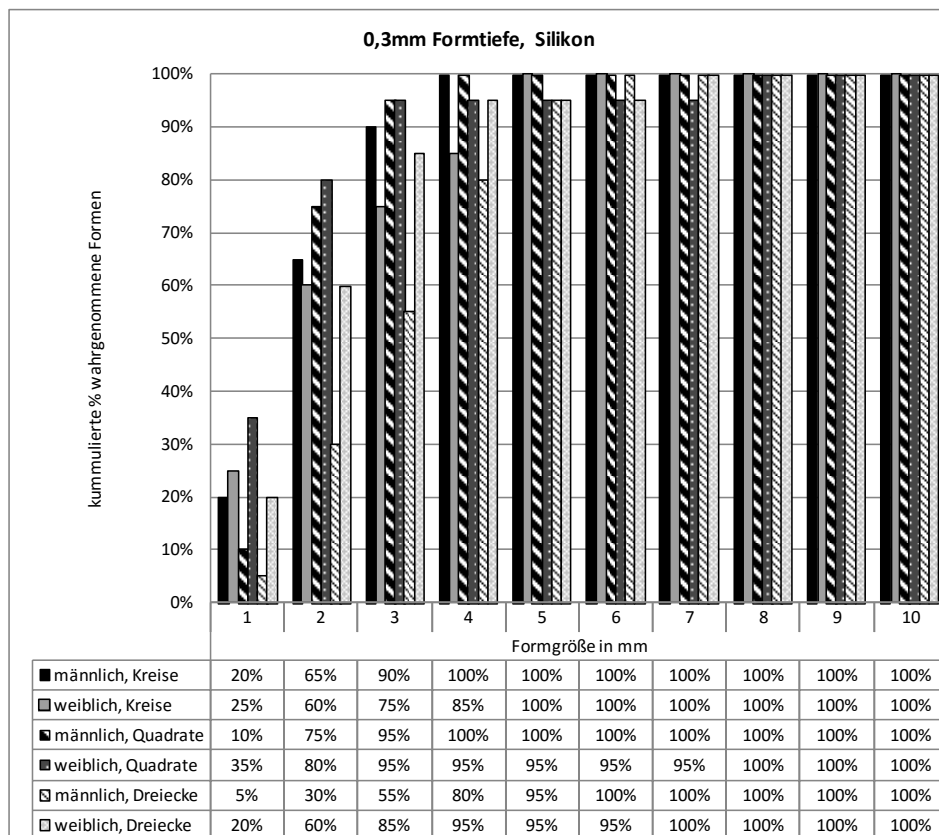
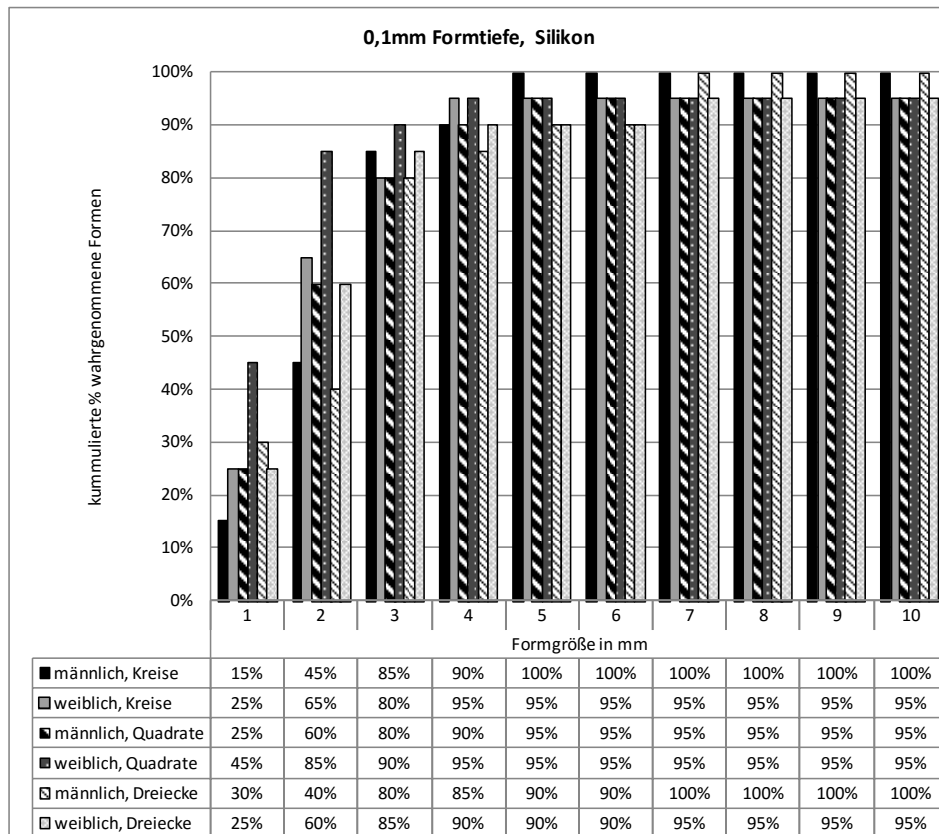


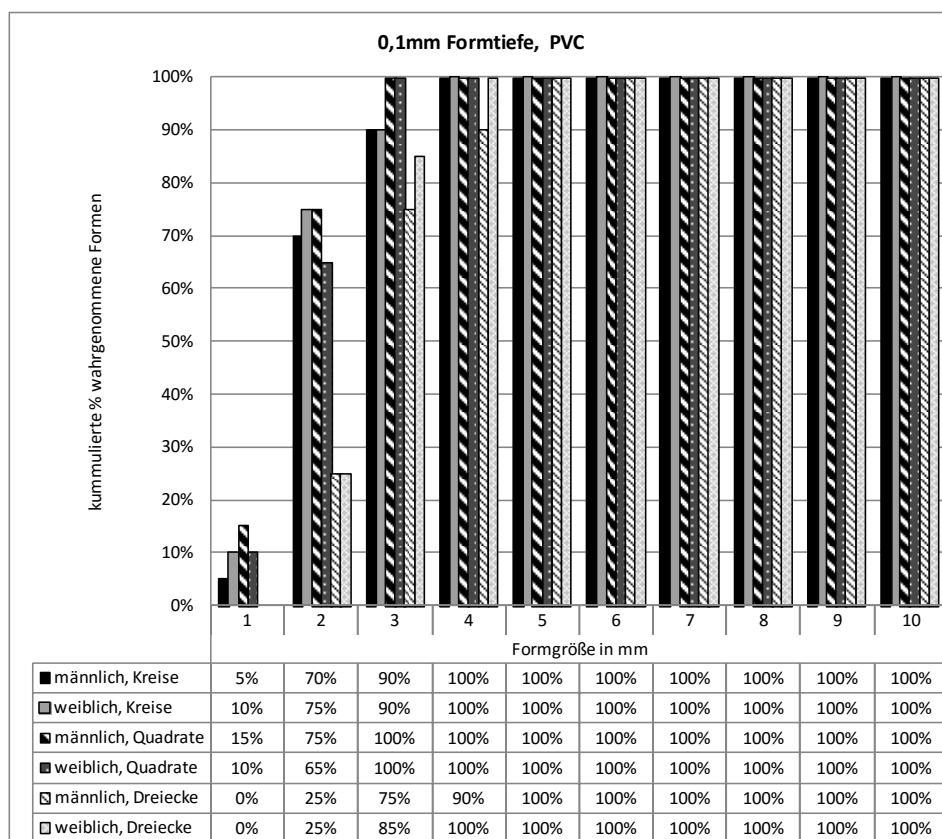
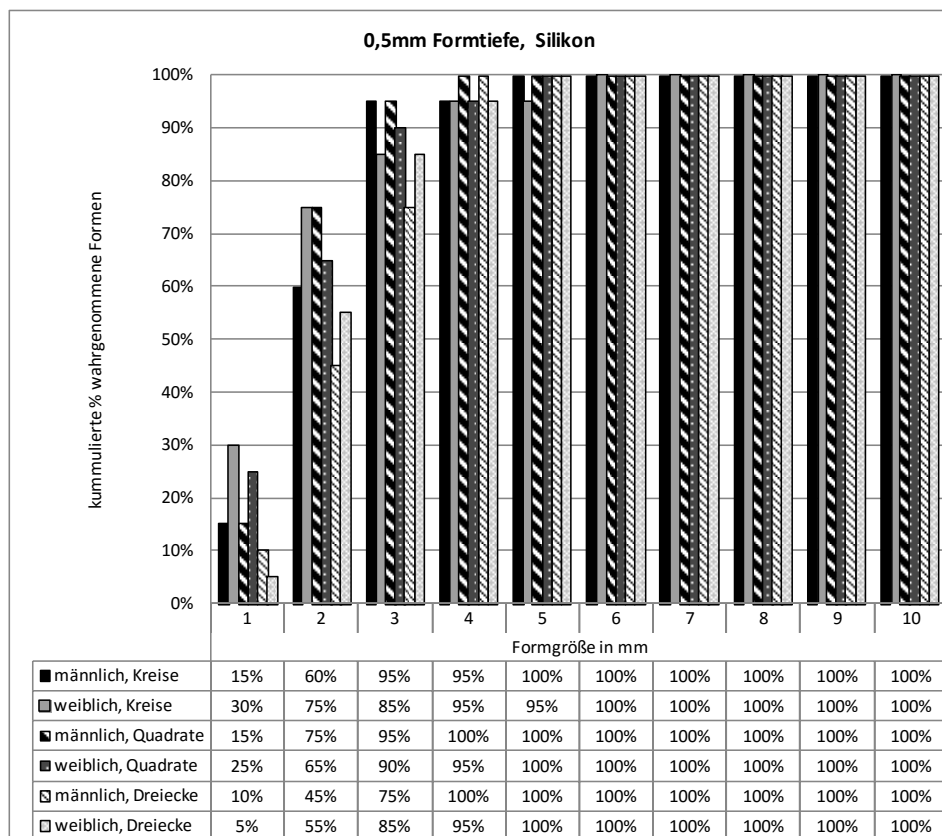


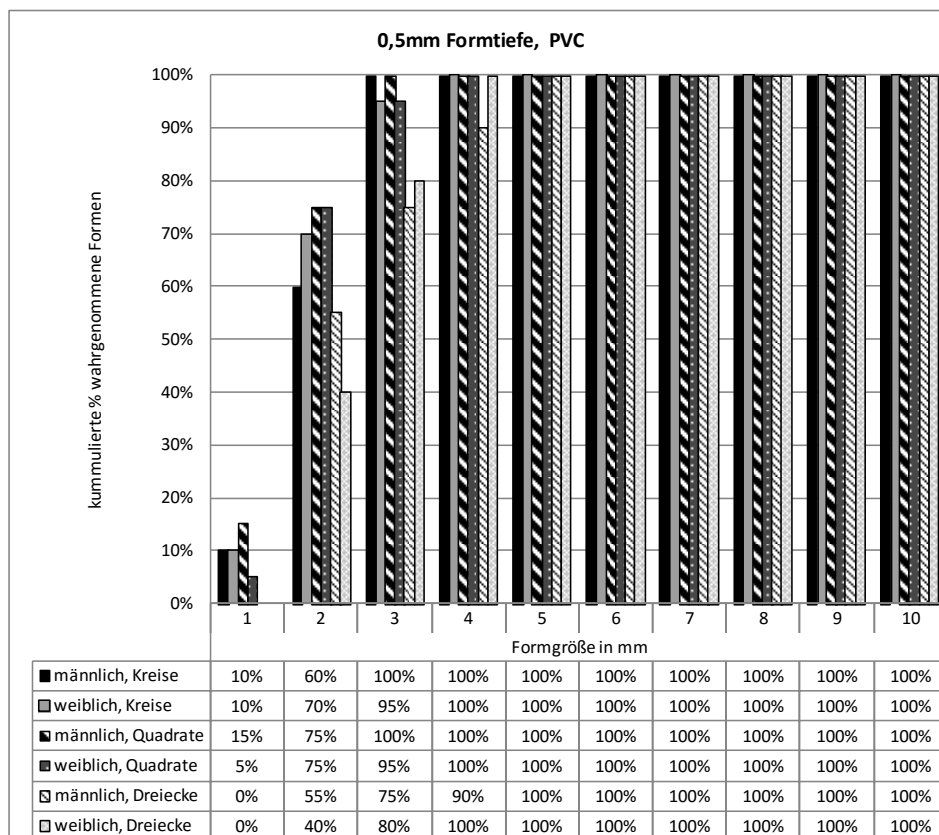
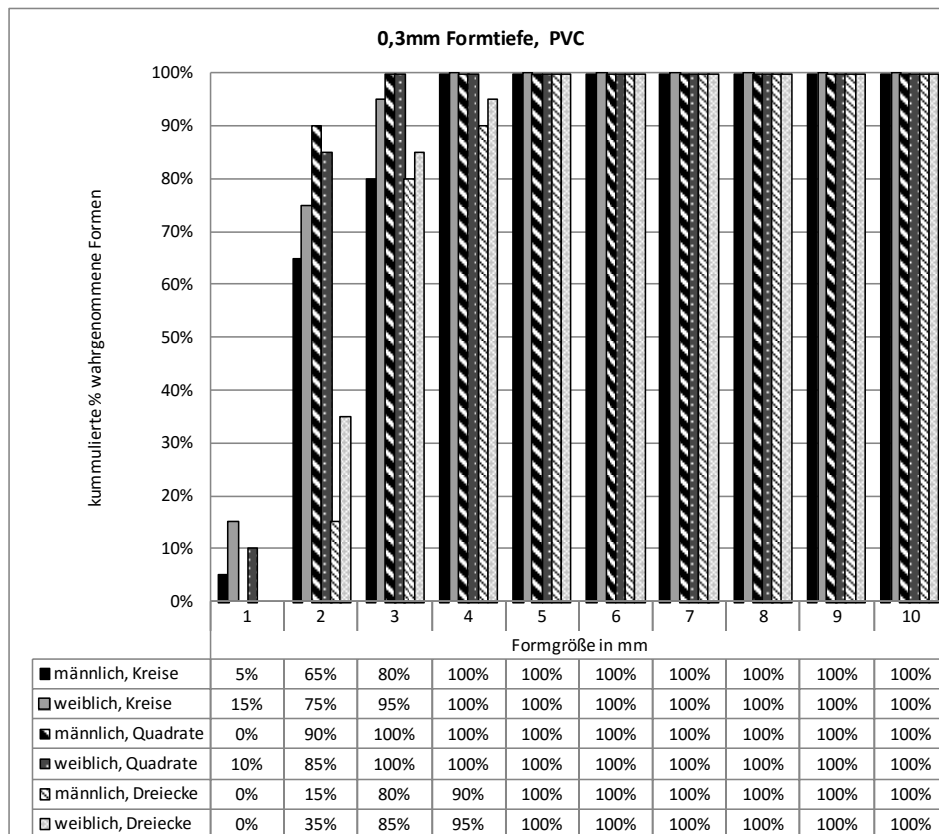


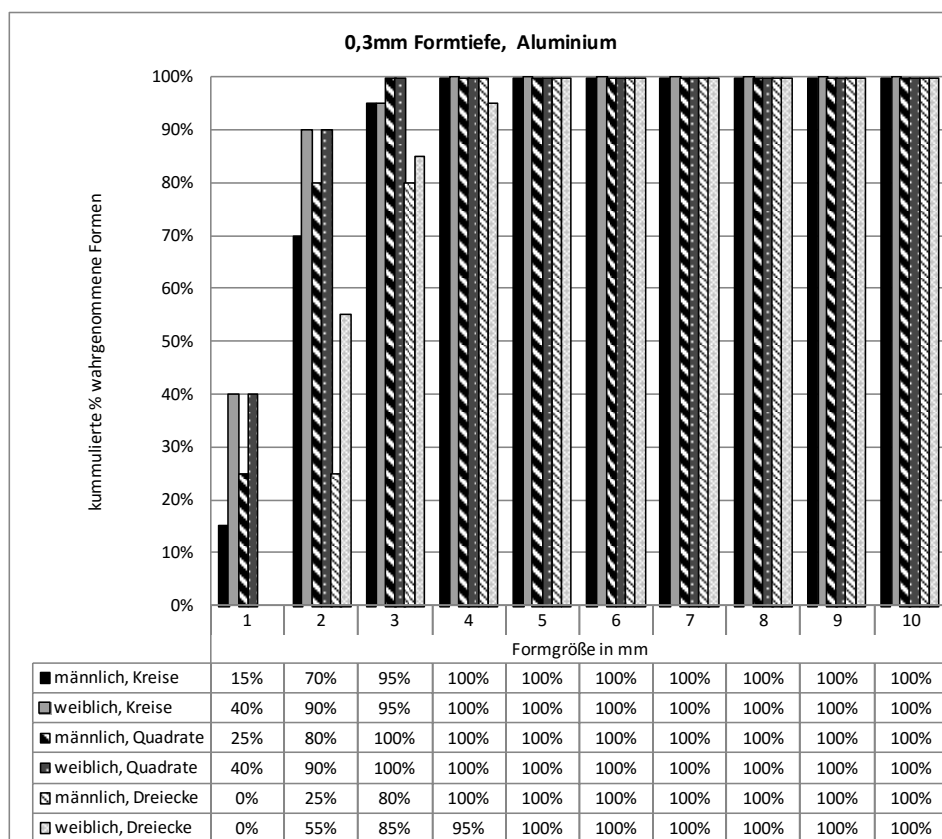
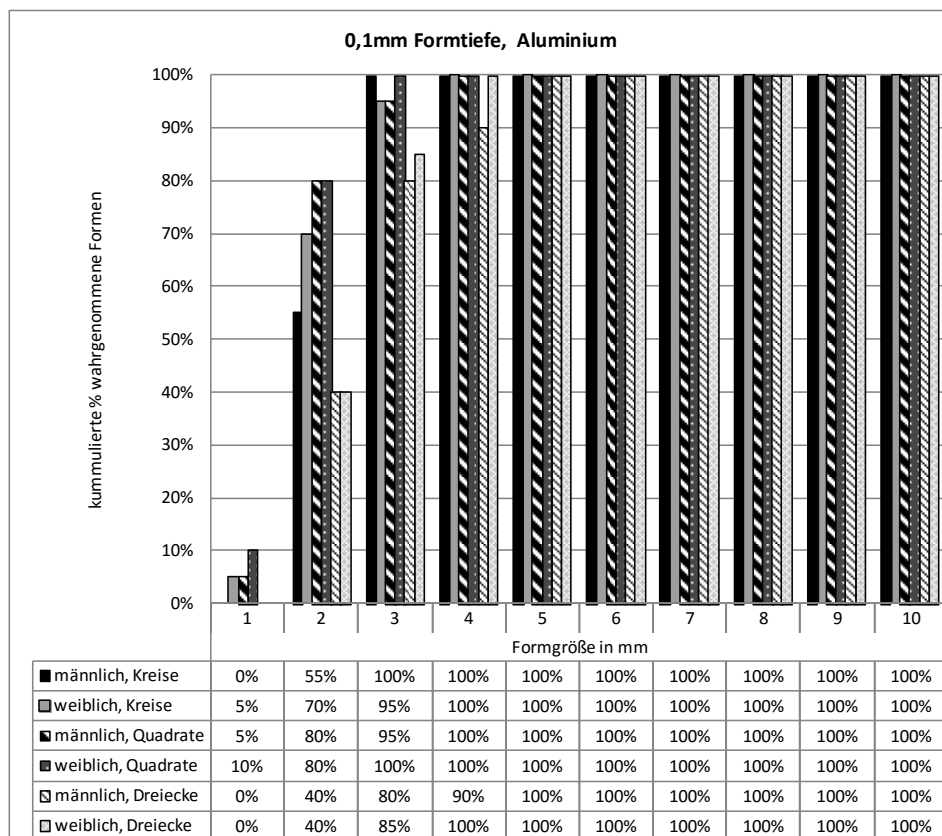


#### A.4.2. Wahrgenommene Formen nach Geschlecht

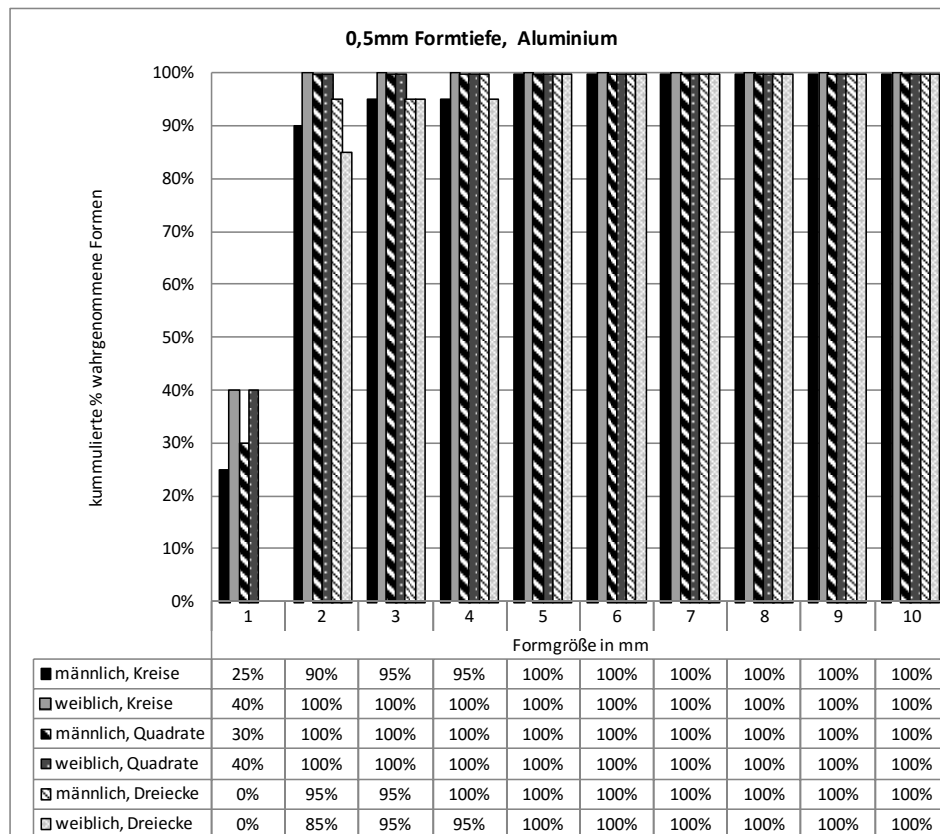




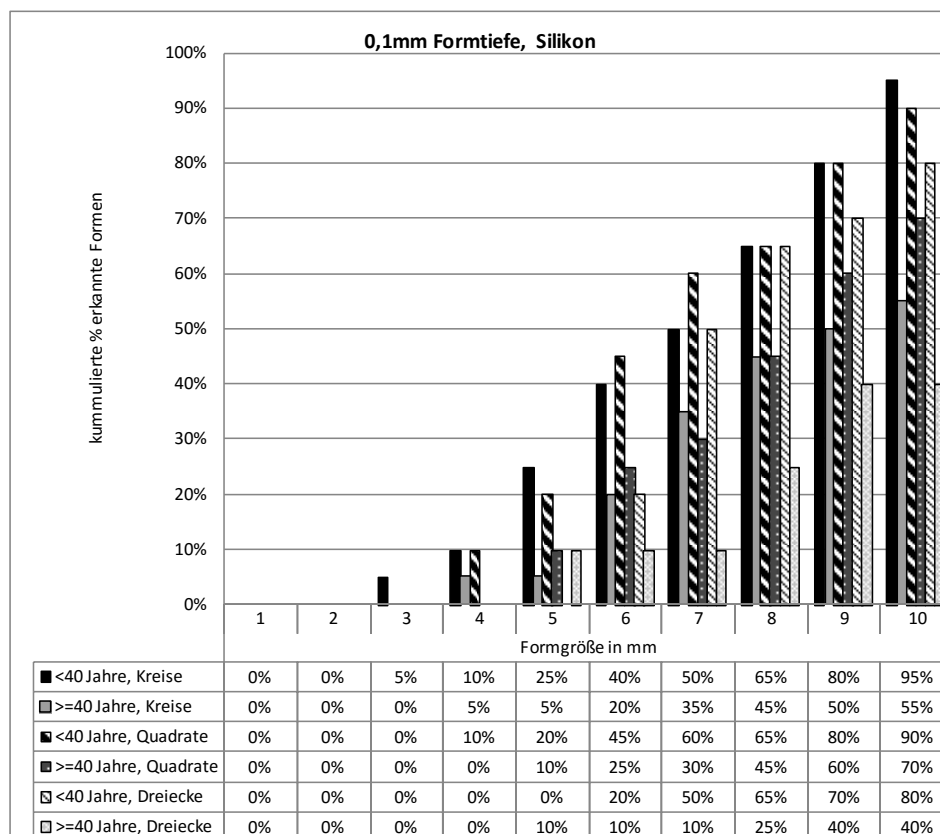


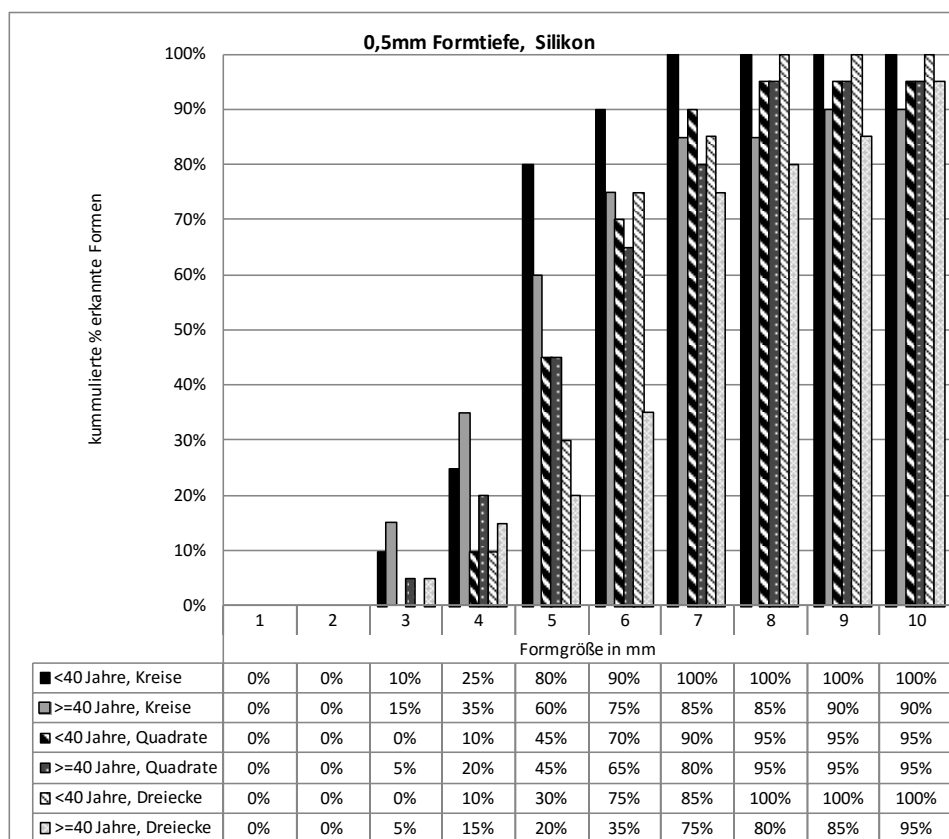
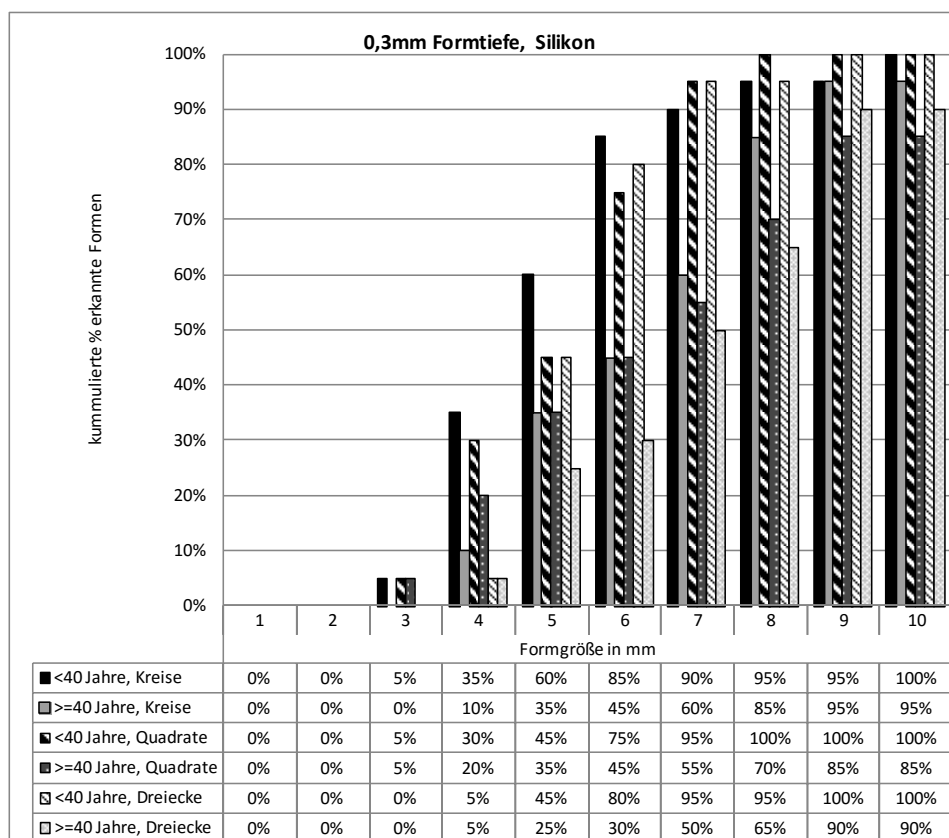


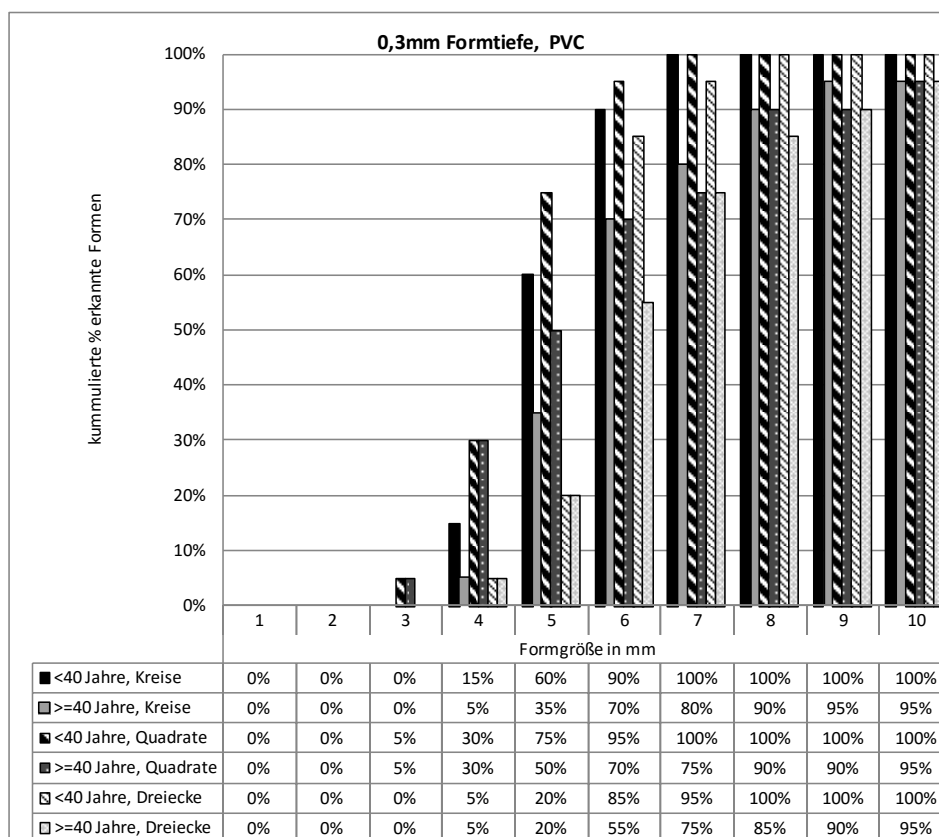
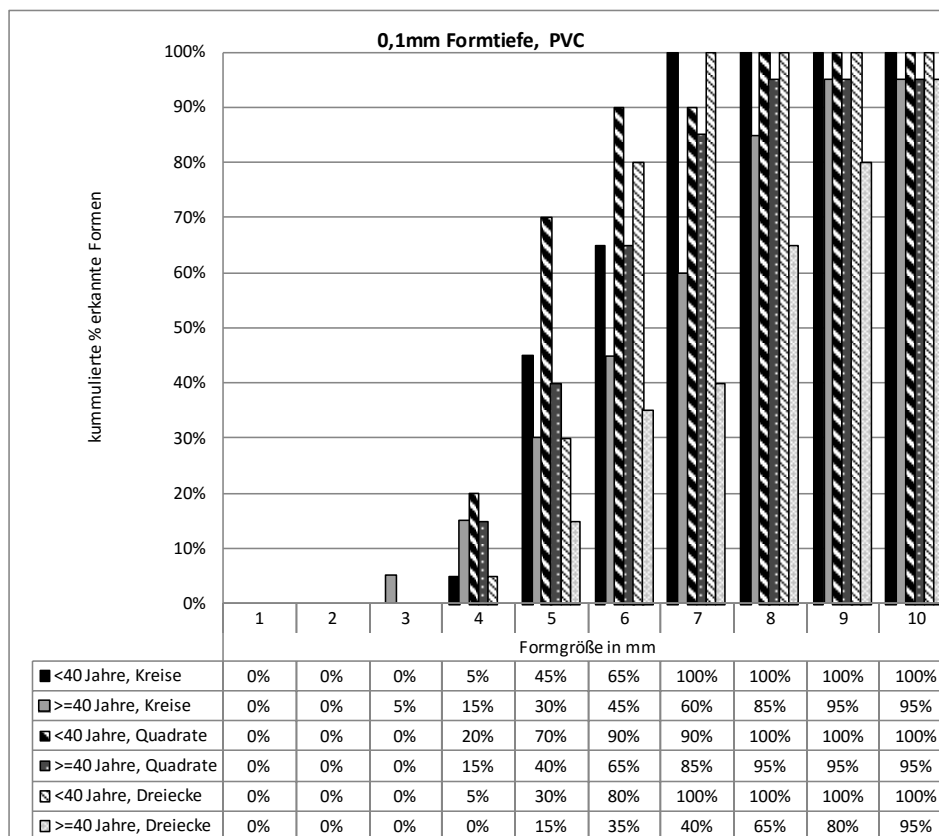


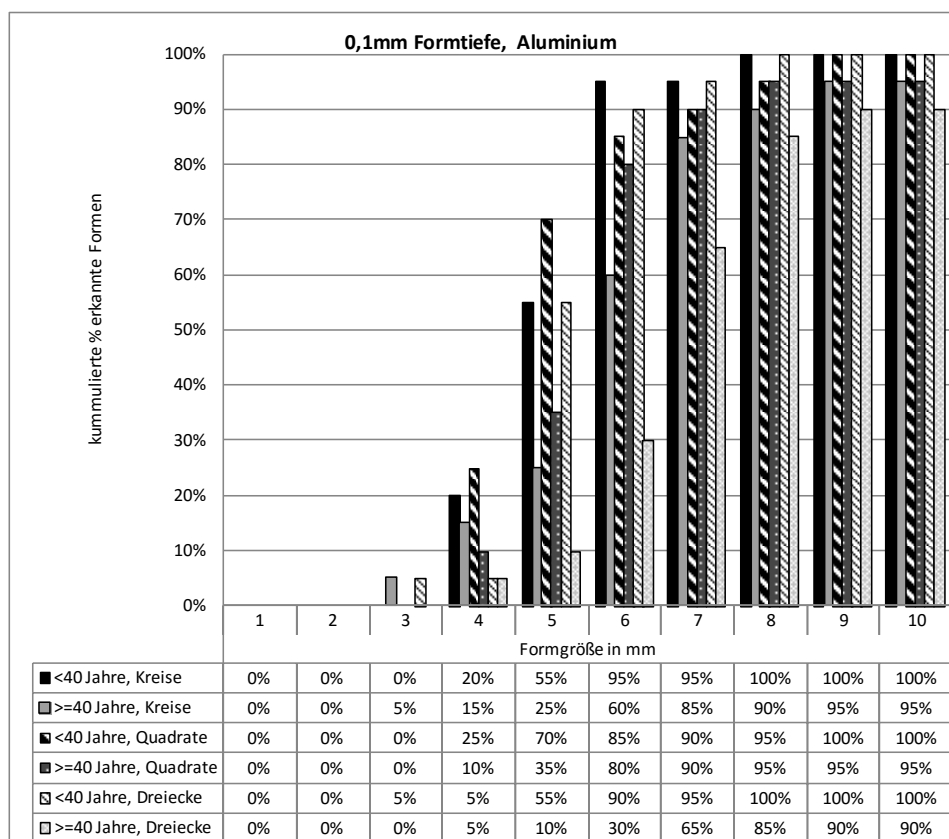
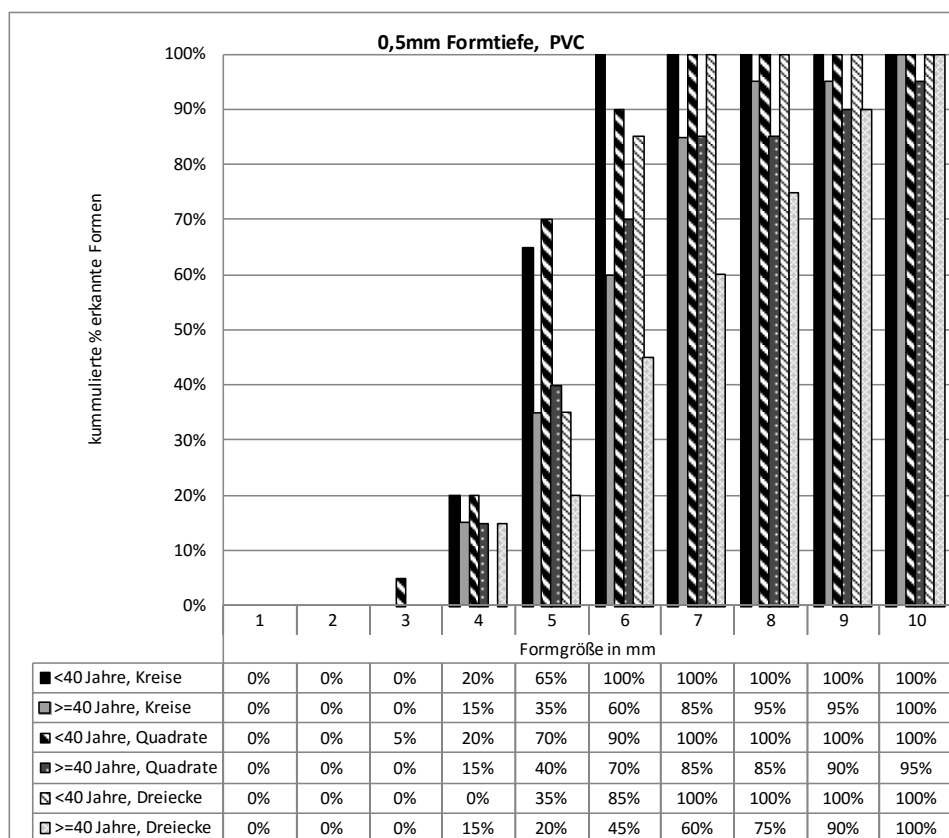


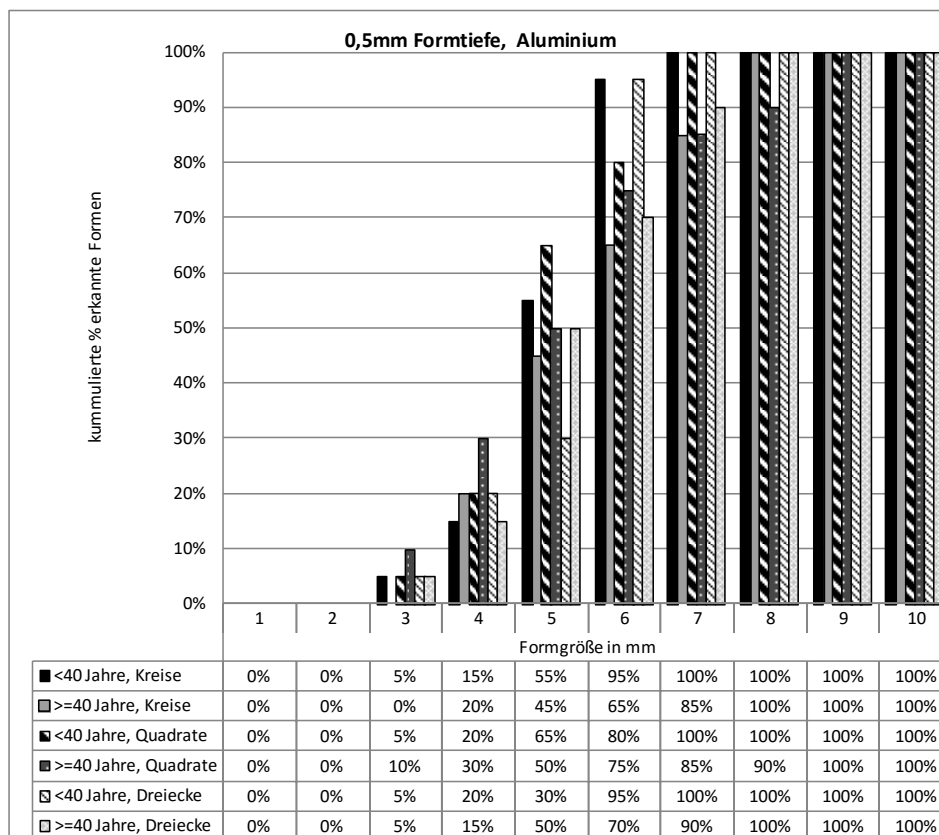
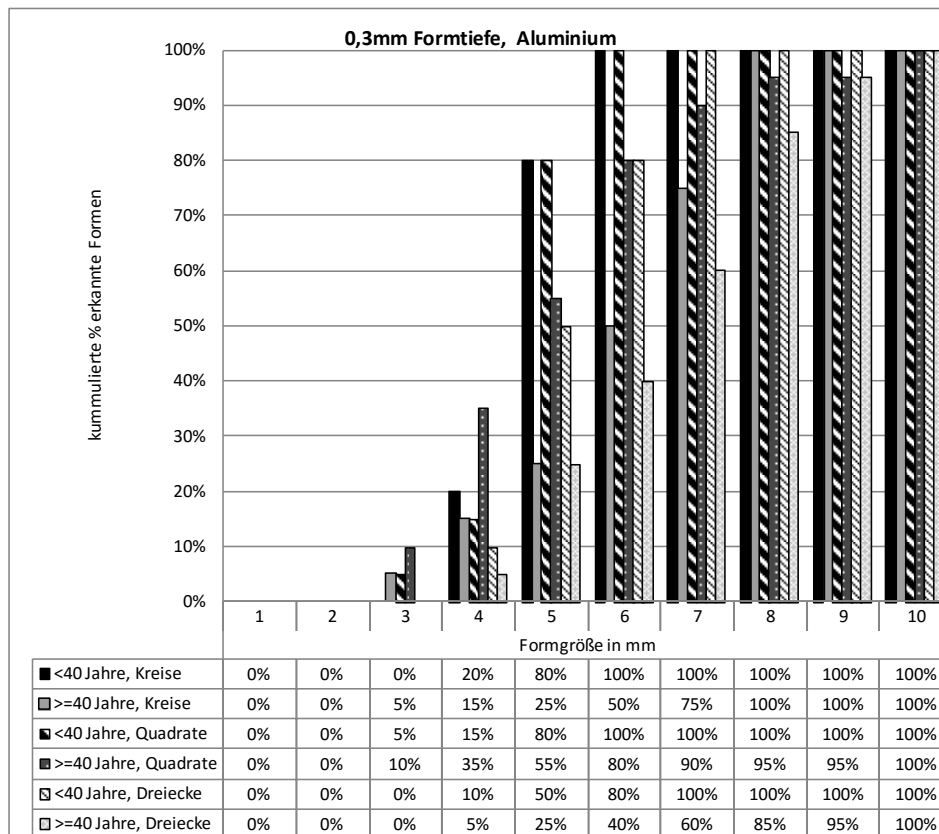
#### A.4.3. Erkannte Formen nach Altersgruppen











#### A.4.4. Erkannte Formen nach Geschlecht

